

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta stavební

Katedra geotechniky a podzemního stavitelství

Stanovení parametrů smykové pevnosti jílovitých zemin
v laboratorních podmínkách

Determination of Shear Strength Parameters of Clayey Soils
in Laboratory Conditions

Student:

Yvona Slámová

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Barbara Luňáčková Ph.D

Ostrava 2018

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta stavební
Katedra geotechniky a podzemního stavitelství

Zadání bakalářské práce

Student: **Yvona Slámová**
Studijní program: **B3607 Stavební inženýrství**
Studijní obor: **3647R017 Geotechnika**
Téma: **Stanovení parametrů smykové pevnosti jílovitých zemin v laboratorních podmínkách**
Determination of Shear Strength Parameters of Clayey Soils in Laboratory Conditions

Jazyk vypracování: **čeština**

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický úvod do problematiky smykových parametrů zemin se zaměřením na soudržné zeminy.
2. Specifikace vrcholových, kritických a reziduálních parametrů smykové pevnosti soudržných zemin.
3. Laboratorní stanovení smykových parametrů zemin.
4. Vyhodnocení

Seznam doporučené odborné literatury:

- ŠIMEK, Jiří, 1990. *Mechanika zemin*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury. ISBN 80-03-00428-4.
- HEAD, K. H., 2006. *Manual of soil laboratory testing*. Third edition. Dunbeath: Whittles Publishing. ISBN 19-044-4536-5.
- ATKINSON, John, 1993. *An introduction to the mechanics of soils and foundations: Through critical state soil mechanics*. New York: McGraw-Hill Book Co. ISBN 007707713X.
- Mesri, G. and Cepeda-Diaz, F. 1986. *Residual shear strength of clays and shales*. Géotechnique, 36(2), 269-274.
- MESRI, Gholamreza a Nejan HUVAJ-SARIHAN, 2012. *Residual Shear Strength Measured by Laboratory Tests and Mobilized in Landslides*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 138(5), 585-593. ISSN 1090-0241.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Barbara Luňáčková, Ph.D.**

Datum zadání: **31.10.2017**

Datum odevzdání: **04.05.2018**

doc. RNDr. Eva Hrubešová, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Čajka, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení

„Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.“

V Ostravě, dne 4. května 2018

Yvona Slámová

Prohlašuji:

- Byla jsem seznámena s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- Bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- Bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- Beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 4. 5. 2018

Poděkování

Ráda bych poděkovala mé vedoucí bakalářské práce paní Ing. Barbaře Luňáčkové, Ph.D za dohled, odborné připomínky, rady při konzultacích, poskytování informací a za pomoc při měření.

Anotace

SLÁMOVÁ, Yvona. *Stanovení parametrů smykové pevnosti jílovitých zemin v laboratorních podmínkách*. Bakalářská práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta stavební, 2018. 57 stran.

Bakalářská práce se zabývá stanovením mechanických, indexových a základních fyzikálních vlastností jemnozrnných zemin v laboratorních podmínkách. Hlavním cílem práce je určit smykové parametry jílovitých zemin pomocí smykové krabicové zkoušky na porušených i neporušených vzorcích. Práce je rozdělena na dvě hlavní části, teoretická část se zabývá obecným rozdělením zemin a jejich vlastnostmi. Následně jsou podrobněji popsány jílovité zeminy se zaměřením na minerální složení. Důležitou součástí je kapitola, která pojednává o smykových pevnostech soudržných zemin. Laboratorní měření se zabývá popisem provedených zkoušek a stanovením základních parametrů dvou vzorků jemnozrnné zeminy.

Klíčová slova:

Smyková pevnost, jílovitá zemina, smyková krabicová zkouška

Annotation

SLÁMOVÁ, Yvona. *Determination of Shear Strength Parameters of Clayey Soils in Laboratory Conditions*. Bachelor thesis. Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Civil Engineering, 2018. 57 p.

Bachelor thesis deals with determination of mechanical, index and basic physical properties of clayey soils in laboratory conditions. The main aim of the thesis was to determine the shear parameters of clayey soils using a shear box test. The thesis is divided into two main parts, the theoretical part deals with the general distribution of soil and their properties. Subsequently, clay soils with a focus on mineral composition are described in more detail. An important part of thesis is the chapter dealing with the assessment of shear strengths parameters of cohesive soils. The part called Laboratory measurement deals with the description of the tests carried out and with the determination of the basic parameters of two samples of fine-grained soil.

Key words:

Shear strength, clayey soil, shear box test

Obsah

1. Úvod	1
2. Charakteristika a rozdělení zemin	2
2.1 Nesoudržné zeminy a jejich vlastnosti	3
2.2 Soudržné zeminy a jejich vlastnosti	4
3. Jílovité zeminy	6
3.1 Jílové minerály	7
3.2 Vlhkost a její vliv na pevnost jílovitých zemin	9
4. Smyková pevnost soudržných zemin	11
4.1 Vrcholová, kritická a reziduální smyková pevnost	13
4.2 Základní typy standardních smykových zkoušek	16
4.3 Smykové přístroje	18
5. Laboratorní měření	21
5.1 Popis vzorků	21
5.2 Popis provedených zkoušek	22
5.2.1 Stanovení zrnitosti zemin	22
5.2.2 Stanovení zdánlivé hustoty pevných částic	24
5.2.3 Stanovení meze tekutosti	25
5.2.4 Stanovení meze plasticity	27
5.2.5 Smyková krabicová zkouška	27
5.3 Vyhodnocení	29
6. Závěr	42
7. Seznam literatury	44
8. Seznam obrázků	47
9. Seznam tabulek	48
10. Seznam grafů	49

Seznam zkratek

I_D	– index relativní ulehlosti
I_P	– index plasticity (%)
I_B	– index křehkosti
e	– konkrétní číslo pórovitosti
e_{\max}	– maximální číslo pórovitosti, které odpovídá nejnakypřenějšímu uložení pro zkoušený materiál
e_{\min}	– minimální číslo pórovitosti, které odpovídá nejtěsnějšímu uložení pro zkoušený materiál
w	– vlhkost (%)
w_L	– vlhkost na mezi tekutosti (%)
w_P	– vlhkost na mezi plasticity (%)
w_S	– vlhkost na mezi smrštění (%)
m_w	– hmotnost vody ve vzorku (g)
m_d	– hmotnost vzorku zeminy po vysušení (g)
τ	– smykové napětí (kPa)
τ_f	– smyková pevnost (kPa)
c ($c_u/c_{ef}/c_r$)	– soudržnost (totální / efektivní / reziduální) (kPa)
$\sigma, \sigma_{ef}, \sigma_{\max}$	– totální napětí, efektivní napětí, maximální napětí (kPa)
φ ($\varphi_u/\varphi_{ef}/\varphi_r$)	– úhlem vnitřního tření (totální / efektivní / reziduální) (°)
u	– pórový tlak (kPa)
m_0	– hmotnost suchého pyknometru (g)
m_1	– hmotnost pyknometru zcela naplněného pomocnou kapalinou (g)
m_2	– hmotnost suchého pyknometru s vysušeným vzorkem (g)
m_3	– hmotnost pyknometru, naplněného saturovaným vzorkem a pomocnou kapalinou (g)
ρ_w, ρ_s	– hustota pomocné kapaliny, hustota pevných částic (g/cm^3)
v_{\max}	– maximální rychlost smýkání (mm/min)
s	– předpokládaná smyková deformace při porušení (mm)
t_f	– doba porušení (min)

1. Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá stanovením smykových parametrů jílovitých zemin v laboratorních podmínkách. Jílovité zeminy jsou v geotechnické oblasti považovány za jednu z velmi rizikových skupin z důvodu jejich specifického chování. Vlastnosti jílu závisí především na obsahu vody v zemině, která výrazně ovlivňuje jejich smykovou pevnost a stlačitelnost. Vzhledem k proměnlivému a citlivému chování těchto jemnozrnných zemin je nutné ke všem laboratorním zkouškám přistupovat velice obezřetně.

Jak již bylo uvedeno, stěžejním cílem této práce bylo v laboratorních podmínkách stanovit smykové parametry jílovitých zemin. Ty byly stanoveny pomocí smykové krabicové zkoušky. Zkoušeny byly dva jílovité vzorky. První (porušený) vzorek „K“ z Klimkovic, druhý vzorek „S“ (neporušený) z Prostřední Suché. U porušeného vzorku byla určena kritická smyková pevnost, u neporušeného vzorku z Prostřední Suché se stanovila pevnost vrcholová a reziduální. Pomocí zrnitostní analýzy bylo také určeno procentuální zastoupení jednotlivých zrnitostních frakcí v zemině, byla provedena pyknometrická zkouška pro stanovení měrné hmotnosti a také zkoušky pro stanovení konzistenčních mezí.

Teoretická část práce je zaměřena především na soudržné zeminy, krátce se věnuje i zeminám nesoudržným. Vysvětleny jsou zde pojmy jako je princip efektivních napětí, Coulombův zákon, Mohr-Coulombova teorie porušení nebo vrcholová, kritická a reziduální smyková pevnost. Jedna z kapitol se také věnuje podrobněji jílovitým zeminám se zaměřením na jejich mineralogické složení.

V závěrečné kapitole této práce jsou zhodnoceny a rekapitulovány všechny výsledky laboratorních měření.

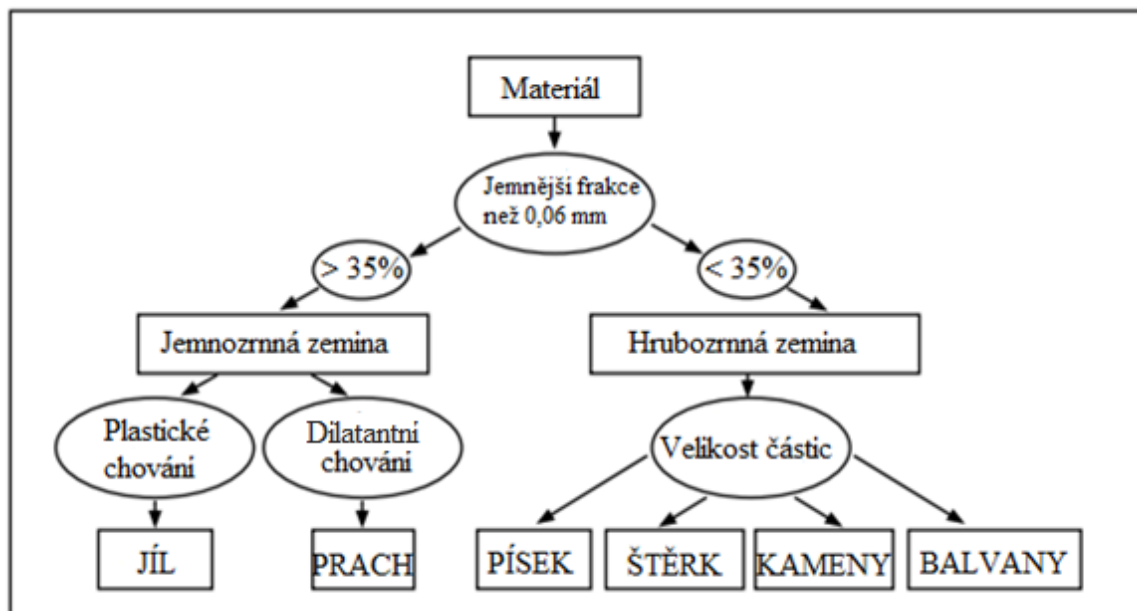
2. Charakteristika a rozdělení zemin

Většina přírodních zemin se skládá z rozpadlých produktů hornin, které byly vystaveny fyzikálním, chemickým nebo biologickým vlivům.

Zemina je definována jako soustava nespojitých částic s různým množstvím vody a vzduchu. Pevné částice jsou ve vzájemném kontaktu a mezi nimi je propojený systém dutin, tzv. pórů. V nasycené zemině jsou póry zcela zaplněny vodou; v suché zemině obsahují pouze plyny. Interakce mezi strukturou zeminy a stavem pórů je zodpovědná za chování půdní hmoty, zejména jejich vlastností v čase [1].

Rozdělení určitých typů zemin do skupin, tříd apod. se nazývá klasifikace. Rozdělování slouží k tomu, aby se určité skupině mohly přisoudit určité, velmi blízké vlastnosti. Snahou je provést zatřídění zemin na základě jednoduchých a časově nenáročných zkoušek. Nejvíce rozšířené jsou klasifikační systémy, které berou v úvahu jak zrnitostní složení zeminy, tak plasticitu jemných částic [3].

Zrnitostní analýza zemin je nezbytným indexovým testem, kterým lze určit, zda se zemina skládá převážně ze šterkovitých, písčitých, hlinitých nebo jílovitých zrn (obr. č. 1). Chování zemin však závisí nejen na velikosti částic, ale i na minerálním složení, struktuře, geologickém vývoji atd. [2].



Obrázek č. 1: Rozdělení zemin [12] (upraveno)

Zeminy rozdělujeme na dvě základní skupiny, soudržné a nesoudržné. Jejich vlastnosti se výrazně liší, a to podle stavu, v jakém se nachází. Výrazný vliv na chování soudržných zemin má vlhkost. Chování nesoudržných zemin ovlivňuje především ulehlost [3].

2.1 Nesoudržné zeminy a jejich vlastnosti

Nesoudržné zeminy mohou být definovány jako zeminy, u nichž jsou síly či vazby mezi jednotlivými zrny zanedbatelné s ohledem na mechanické chování zemin. Tato kategorie zahrnuje zeminy, které obsahují jen malé množství jemné frakce (zrna < 0,063 mm). U těchto zemin určujeme vzhledem k jejich vysoké propustnosti převážně efektivní parametry smykové pevnosti. Výjimku tvoří např. zvodnělé čočky písku, které jsou obklopeny málo propustnými zeminami. Nesoudržné zeminy jsou propustné, mechanické vlastnosti jsou ovlivněny především ulehlostí [3].

U sypkých zemin z hlediska proměnlivosti vlastností má nejdůležitější roli vzájemné uložení zrn. Z tohoto důvodu se charakteristika sypké zeminy vyjadřuje porovnáním konkrétního čísla pórovitosti e zeminy s maximálními a minimálními hodnotami čísla pórovitosti zjištěnými pro danou zeminu v laboratoři. Číselně lze stav zeminy vyjádřit pomocí indexu relativní ulehlosti I_D [3]. Dle velikosti indexu ulehlosti usuzujeme na jeho stavu (Tabulka č. 1).

$$I_D = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}}$$

e – konkrétní číslo pórovitosti

e_{\max} – maximální číslo pórovitosti, které odpovídá nejnakypřenějšímu uložení pro zkoušený materiál

e_{\min} – minimální číslo pórovitosti, které odpovídá nejtěsnějšímu uložení pro zkoušený materiál

Index relativní ulehlosti tedy vyjadřuje stupeň ulehlosti hrubozrnných zemin vzhledem k nejvolnějšímu a nejtěsnějšímu uložení zrn [18].

Tabulka č. 1: Kritéria ulehlosti dvou platných norem [7].

Kritéria ulehlosti dle ČSN 73 1005		Kritéria ulehlosti dle ČSN EN 14688-2	
Stav	Relativní ulehlost I_D	Stav	Relativní ulehlost I_D [%]
<i>Kyprý</i>	$< 0,33$	<i>Velmi kyprý</i>	0 až 15
<i>Středně ulehlý</i>	0,33 až 0,67	<i>Kyprý</i>	15 až 35
<i>Ulehlý</i>	$> 0,67$	<i>Středně ulehlý</i>	35 až 65
		<i>Ulehlý</i>	65 až 85
		<i>Velmi ulehlý</i>	85 až 100

2.2 Soudržné zeminy a jejich vlastnosti

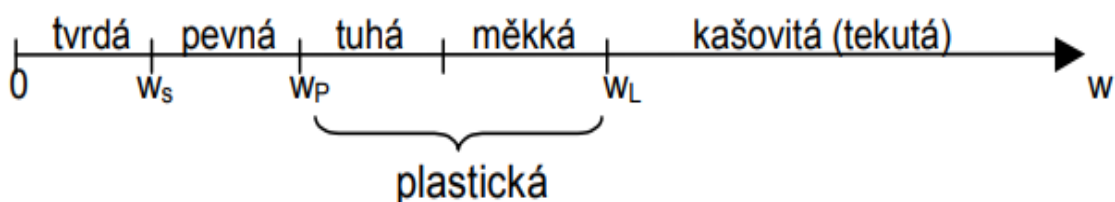
Soudržné zeminy jsou směsí jemných (jílovitých a hlinitých) a hrubých zrn. Pro jemnozrnné zeminy všech tříd je základním rozlišovacím znakem jejich stav, resp. jejich konzistence. Konzistence resp. konzistenční stav je fyzikální stav závislý na vlhkosti soudržných zemin. Tento stav soudržných zemin se vyjadřuje vzájemným porovnáním konkrétní vlhkosti zeminy s konzistenčními mezemi, vlhkostí na mezi tekutosti w_L a vlhkostí na mezi plasticity w_P [7].

Jestliže je zemina jemnozrnná, zkoumá se, zda se jedná o jíl nebo hlínu. Toto rozdělení je v klasifikaci dle ČSN 73 6133 [22] (resp. dle již zrušené ČSN 73 1001) prováděno pomocí vlhkosti na mezi tekutosti a vlhkosti na mezi plasticity. V terénu lze stanovit, zda se jedná o jíl nebo hlínu pomocí tzv. dilatančního testu. Dostatečně mokrá zemina se umístí do otevřené dlaně ruky a protřepe se. Na povrchu se rychle objeví voda, při stlačení vzorku zmizí. Vzorek má tendenci dilatovat a vracet se do původního stavu. V tomto případě se jedná o jíl. U hlíny tyto charakteristiky nepozorujeme. V laboratoři můžeme rozdělení určit pomocí Atterbergových testů [12].

Podle obsahu vody, může být soudržná zemina v konzistenčním stavu tekutém, plastickém, pevném nebo tvrdém (obr. č. 2). Mezi jednotlivými stavy existují smluvní meze tzv. (Atterbergovy) konzistenční meze [8].

Atterbergovy konzistenční meze:

- mez tekutosti w_L
- mez plasticity w_P
- mez smrštění w_S



Obrázek č. 2: Osa konzistenčních mezí [8]

Jestliže je konkrétní vlhkost zeminy v rozsahu mezi mezemi tekutosti a plasticity, zemina se chová plasticky. Zároveň zemina vykazuje určitou smykovou pevnost τ_{op} . Jakmile dojde k překročení této hodnoty, začne se zemina plasticky přetvářet. Pokud se vlhkost soudržné zeminy dostane nad mez tekutosti, označujeme tento stav za kašovitý až tekutý, v takovémto stavu zemina klade velice nízký, nebo žádný odpor proti smykovému přetvoření. Naopak při snížení vlhkosti začíná zemina křehnout. Skutečně křehkou se zemina stává při poklesu vlhkosti pod mez smrštění w_s . V tomto stavu se voda stahuje kapilárními a sorpčními silami dovnitř, zeminu lze lámat a rozbíjet [3].

Nejdůležitější vlastností jílu je jeho plasticita. Při vysoké plasticitě může být zemina tvarována nebo deformována v širokém rozsahu, aniž by došlo k praskání nebo projevování změn objemu [12].

Konzistenční stav soudržné zeminy se posuzuje podle hodnoty indexu konzistence. (Tabulka č. 2)

Tabulka č. 2: Konzistence zeminy podle dvou platných norem [7].

Konzistence zeminy podle ČSN 73 1005		Konzistence zeminy podle ČSN EN ISO 14688-1	
Konzistence	Index konzistence	Konzistence	Index konzistence
Kašovitá	$< < 0,05$	Velmi měkké	$< 0,25$
Měkká	$0,05 - 0,50$	Měkké	$0,25 \text{ až } 0,50$
Tuhá	$0,50 - 1,00$	Tuhé	$0,50 \text{ až } 0,75$
Pevná	$>> 1,00$	Pevné	$0,75 \text{ až } 1,00$
Tvrdá	-	Velmi pevné	$> 1,00$

K vyjádření rozsahu vlhkosti, ve kterém je zemina plastická používáme index plasticity I_p . Tento index je definován jako rozdíl vlhkosti na mezi tekutosti a vlhkosti na mezi plasticity.

3. Jílovité zeminy

Jílovitá zemina je přírodní materiál, který je složen z jemnozrnných minerálů. Velikost jemnozrnných zrn je ale do velké míry obecná a nelze ji přesně určit, neboť se liší ve všech vědeckých odvětvích. Guggenheim definuje jílové frakce částice, jejichž velikost je menší než 0,002 mm [9]. Moore a Reynolds uvádí, že je velikostní limit obvykle nastaven na velikost částic pod 0,004 mm [4]. Podle platné normy ČSN EN ISO 14688-2 [19] je definována jemnozrnná frakce menší než 0,063 mm a jílovité částice pod 0,002 mm v rámci celkové hmotnosti hrubé a jemné frakce zeminy [19]. Kromě rozměru zrna se však významně uplatňuje i mineralogické složení. Jíly při stejném zrnitostním složení a stejné vlhkosti mohou mít výrazně odlišné chování [15].

Nejdůležitější vlastnost těchto zemin je jejich vlhkost, která tak ovlivňuje další vlastnosti. Při vysychání jílu se jejich objem zmenšuje a začne se smršťovat. Naopak při kontaktu s vodou mohou jíly zvětšit svůj objem a bobtnají, jejich stlačitelnost se zvyšuje. Obecně je možné říci, že čím méně jílovitá zemina obsahuje vody, tím je pevnější [15].

Mechanické chování jílu je určeno především plasticitou, která vyjadřuje schopnost materiálu být formován do jakéhokoliv tvaru. Tato vlastnost závisí na obsahu vody, je značně ovlivněna chemickým složením a může být ovlivněna také celkovou povahou částic v materiálu [9].



Obrázek č. 3: Jílovitá zemina [10]

3.1 Jílové minerály

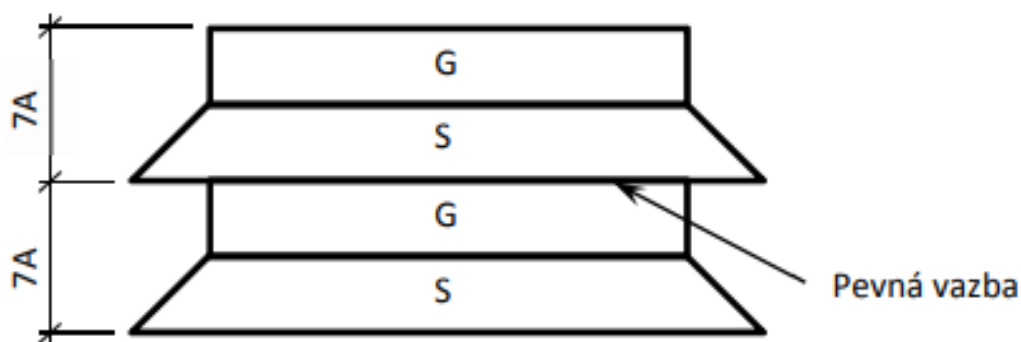
Jílové minerály jsou nejhojněji zastoupené minerály na povrchu Země. Tvoří základ recentních sedimentů a půd, jsou hojně přítomny ve starších horninách (především sedimentárních), jejich výchozy pokrývají asi 75 % zemského povrchu a jsou součástí pelagických bahen pokrývajících oceánské pánve. Nejčastěji bývají produkty chemického zvětrávání minerálů, jako jsou živce a ostatní silikátové minerály. Zvětrávání je zahájeno ve chvíli, kdy se minerály dostanou do kontaktu s atmosférou a začnou s ní reagovat. Malá velikost zrn a velký poměr plochy povrchu k objemu dávají jílovým minerálům soubor jedinečných vlastností - vysoce reaktivní povrchy včetně vysokých kationtových výměnných kapacit, katalytické aktivity a plastické chování při kontaktu s vodou [4].

V oblasti mineralogie je výzkum jílových minerálů jeden z nejobtížnějších. Studium těchto minerálů se zabývalo mnoho vědců a mineralogů. Jedním z nich je i vynikající francouzský fyzikální chemik M. H. LeChatelier, který koncem 19. století použil pro výzkum jílových materiálů nové účinné metody, a to termické analýzy. Rychle zahříval jílové minerály a sledoval pomocí elektrických termočlánků endotermní a exotermní reakce až do 1000°C. Podle získaných charakteristických diagramů rozdělil již tehdy jílové minerály do pěti skupin: skupinu kaolinu, halloysitu, pyrofyllitu, montmorillonitu a allofany [5].

Jílové minerály jsou podskupinou sekundárních minerálů. Vznikají chemickými přeměnami horninotvorných minerálů v průběhu zvětrávání. Vyznačují se slabou krystalizační schopností a malou pevností, částice mají rozměry tisícín až desetitisícín milimetru. Mají tvar podobný jemným šupinkám, trubičkám nebo jehličkám. Všechny hlavní jílové minerály mají vrstevnatou krystalickou mřížku [3]. Základní stavební jednotky ve struktuře jílových minerálů jsou křemíkové tetraedry a hliníkové oktaedry. Typickými vlastnostmi jsou plasticita, sorpční schopnosti a bobtnavost [5]. Vrstevnaté mřížky jílových minerálů tvoří pravidelně se opakující seskupení tetraedrických a oktaedrických vrstev. Podle počtu vrstev v opakujícím se elementárním souvrství rozlišujeme jedno-, dvou-, troj- a vícevrstvé minerály. Spojení jednotlivých vrstev elementárního souvrství je pevné, spojení sousedních souvrství může být pevné (tuhé) nebo pružné (pohyblivé). Na kontaktních plochách souvrství, tzv. bazálních rovinách, mohou být valence vyrovnané, nebo tady zůstávají volné záporné náboje [3].

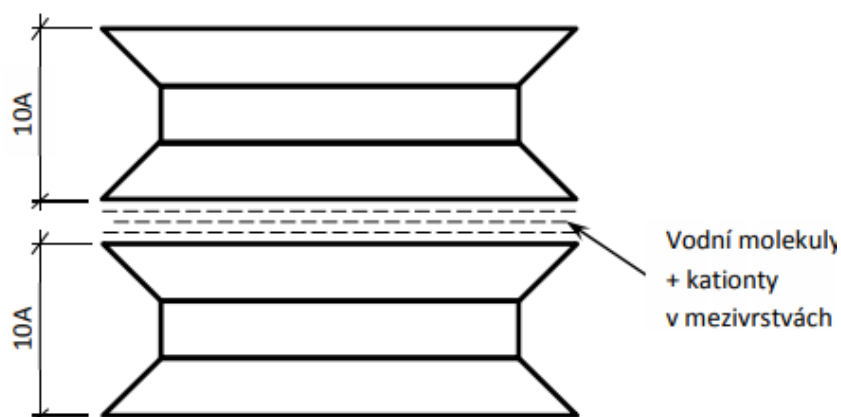
Podle stavby mřížky rozlišujeme tři hlavní skupiny jílových minerálů: skupinu kaolinitu, montmorillonitu a illitu [3].

Kaolinit vzniká zpravidla rozpadem alkalických živců v kyselém prostředí. Tvoří poměrně velké bílé šupiny šestiúhelníkového tvaru, povrch i hrany částic jsou hladké. Mřížka kaolinitu je dvouvrstvá (obr. č. 4), kontakty mezi vrstvami jsou tuhé. Povrchová aktivita, tj. schopnost vázat hydratované kationty a molekuly vody, je u dobře vykrytalizovaných kaolinitů poměrně malá [3].



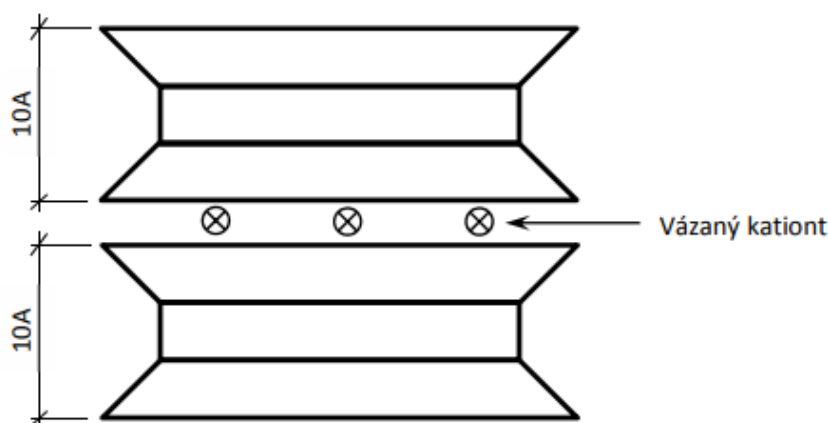
Obrázek č. 4: Schéma krystalické mřížky kaolinitu ($A = 0,1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$) [8]

Montmorillonit je trojvrstvý minerál. Je to minerál bílé barvy s nádechem do žluta nebo do zelena. Jeho zvláštností je slabý, pružný kontakt mezi bazálními rovinami elementárních trojvrství (obr. č. 5): molekuly vody a hydratované kationty mohou vnikat mezi bazální roviny a rozevírat je, vyvolávají bobtnání. Montmorillonitické jíly jsou tzv. bentonity. Vyznačují se schopností přijímat a udržet velké množství vody. Při změnách vlhkosti podléhají značným objemovým změnám. Tyto jíly využíváme v technologii zakládání staveb jako husté výplachy při vrtání, jako pažící suspenze na budování podzemních stěn nebo při vrtání velkopřůměrových pilot, těsnící injektáž obezdívek tunelů, na vodních stavbách a jinde [3].



Obrázek č. 5: Schéma krystalické mřížky montmorillonitu [8]

Illity (hydroslídy) jsou jílové minerály různých barev, od bílé až po tmavě hnědou, se stejnou strukturní stavbou jako montmorillonit (obr. č. 6), ale bazální roviny elementárních trojvrství jsou pevně spojeny kationty draslíku, popř. sodíku. Schopnost vázat vodu a hydratované kationty je u této skupiny větší než u kaolinitu, ale podstatně menší než u montmorillonitu [3].



Obrázek č. 6: Schéma krystalické mřížky illitu [8]

3.2 Vlhkost a její vliv na pevnost jílovitých zemin

Vlhkost je jednou ze základních popisných a fyzikálních vlastností zeminy. Voda, která zcela nebo z části vyplňuje mezery mezi pevnými částicemi, má velký vliv na vlastnosti zeminy a její chování při zatížení [14].

Zjištění vlhkosti je založeno na zvážení vzorku zeminy a jeho následném vysoušení při teplotě $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ až do té doby, než je hmotnost vzorku konstantní a všechna absorbovaná voda je odstraněna. Pro většinu zemin je konstantní hmotnosti dosaženo po 24 hodinách vysoušení. Následně je zemina odstraněna ze sušárny, zchlazena a zvážena [11].

Vlhkost je definována jako poměr hmotnosti vody v zemině k hmotnosti vysušené zeminy vyjádřená v procentech.

$$w = \frac{m_w}{m_d} \times 100$$

w – vlhkost (%)

m_w – hmotnost vody ve vzorku (g)

m_d – hmotnost vzorku zeminy po vysoušení (g)

Podzemní vodu můžeme rozlišit, jako vodu vázanou, volnou a strukturální [17]. Voda vázaná je relativně pevně vázána na stěny pórů. Obecně je možno rozlišit několik typů vazeb mezi molekulami vody a stěnami pórů např. známé van der Waalsovy síly. Snížená pohyblivost takto vázaných molekul vody je příčinou toho, že při poklesu teploty pod 0 °C nemrzne. Jednotlivé molekuly jsou však na povrchu pórů uspořádány s jistou pravidelností, která do určité míry připomíná krystalizaci. Tuto pevně vázanou vodu je možno z materiálu odstranit velmi obtížně a pouze za vysokých teplot (150°C - 300°C). Vázaná voda tedy výslednou vlhkost zemin, stanovenou výše popsáním způsobem, neovlivní. Druhým typem je tzv. voda volná. Ta není vázaná na stěny pórů, ale může se v pórovitém systému vlivem gravitace, kapilárních nebo jiných sil pohybovat. Při zahřívání na teplotu těsně nad 100 °C volně vázaná voda z pórovitého systému odchází [16].

Úřad vojenského výzkumu oddělení armády, prostřednictvím smlouvy s Ústavem inženýrského výzkumu Kalifornská univerzita v Berkeley, podporuje zkoumání základních geologických příčin pevnosti v půdě. Účelem tohoto šetření bylo studium vlivů vody, která ovlivňuje pevnost zemin. K testování byly použity vzorky:

- jíl z Gruzie, který byl téměř čistým kaolinitem
- jíl ze státu Illinois tvořený z 80% illitem a z 20% klastickými částicemi
- bentonit z Wyomingu, který obsahoval 97% montmorillonitu

Dle článku [17] pevnost illitu a kaolinitu při daném obsahu vody vykazovaly v podstatě stejnou pevnost ve smyku. Montmorillonit měl mnohem větší pevnost než předešlé dva vzorky jílu.

4. Smyková pevnost soudržných zemin

Nejčastějším způsobem porušení zemin je porušení smykem. Nejstarší teorií popisující smykové porušení zemin je Coulombova teorie porušení, která uvádí vzájemný vztah mezi maximálním smykovým odporem zemin a normálovým napětím působícím v rovině porušení. V obecném případě má smyková pevnost dvě složky: vnitřní tření, charakterizované úhlem vnitřního tření a soudržnost, kterou lze charakterizovat jako smykovou pevnost při nulovém normálovém namáhání. Tento vztah je v mechanice zemin označován jako Coulombův zákon [1]:

$$\tau_f = c + \sigma \times \tan \varphi$$

τ_f – smyková pevnost (kPa)

c – soudržnost (kPa)

σ – totální napětí (kPa)

φ – úhlem vnitřního tření (°)

Tato rovnice je rovnicí přímky, která svírá osou normálových napětí úhel roven úhlu vnitřního tření a vytíná na ose tangenciálních napětí hodnotu soudržnosti a nese název Coulombova čára pevnosti, nebo jen čára pevnosti (obr. č. 7). Soudržnost a vnitřní tření jsou označovány jako tzv. parametry smykové pevnosti. Porušení zeminy nastane dle Coulomba tehdy, dosáhne-li smykové napětí τ hodnoty smykové pevnosti τ_f .

Tření je způsobeno vzájemným propojením částic a třením mezi nimi při vystavení normálovému efektivnímu namáhání. Soudržnost je způsobena vnitřními silami, sukci, popř. cementací zrn, které drží společně částice zeminy v pevné hmotě. Tření se zvyšuje se zvyšujícím se namáháním, avšak soudržnost zůstává konstantní [1].

Jedním z nejvýznamnějších zákonů mechaniky zemin je tzv. Princip efektivních napětí. Uvažujeme-li saturovanou zeminu, bude normálové napětí σ dáno součtem efektivního napětí a pórového tlaku:

$$\sigma = \sigma_{ef} + u$$

σ – totální napětí (kPa)

σ_{ef} – efektivní napětí (kPa)

u – pórový tlak (kPa)

Tuto rovnici a pojem efektivní napětí poprvé uvedl Terzaghi v roce 1924. Význam efektivního napětí zdůrazňuje ve druhém prohlášení; všechny měřitelné účinky změny napětí jsou způsobeny výhradně změnami efektivního namáhání [3]. Jestliže se bude zvětšovat pouze totální napětí a efektivní se nezmění, smyková pevnost zůstane stejná, protože voda nemá prakticky žádnou pevnost ve smyku. Proto rozlišujeme:

1. Totální parametry smykové pevnosti φ_u, c_u (nebo jen φ, c)

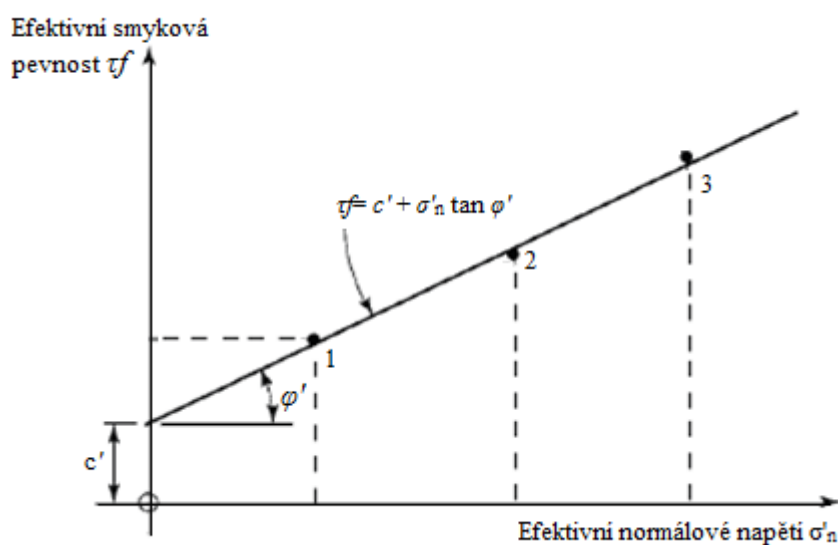
Totální napětí závisí na způsobu zatížení zeminy vlastní tíhou a vnějšími účinky. Když je pórová voda v klidu, je pórový tlak roven hydrostatickému tlaku vody, když voda proudí, hydrodynamickému tlaku [3]. Totální parametry c_u, φ_u zjistíme pomocí nekonsolidovaných a neodvodněných zkoušek. Během zkoušky se nemění obsah vody v pórech zeminy [8].

2. Efektivní parametry smykové pevnosti φ_{ef}, c_{ef} (nebo φ', c')

Efektivní napětí je rozdíl napětí totálního a neutrálního. Efektivní parametry charakterizují zeminu, na kterou působí zatížení tak dlouho, že zatížení přenáší pouze zrna a přírůstky pórového tlaku v důsledku smýkání se měly možnost rozptýlit. Parametry určíme buď z konsolidovaných odvodněných zkoušek, nebo ze zkoušek konsolidovaných neodvodněných, kdy měříme pórový tlak [8].

Coulombův vztah tedy můžeme zapsat v totálních nebo efektivních hodnotách [3].

$$\tau_f = c_{ef} + (\sigma - u) \tan \varphi_{ef} = c_{ef} + \sigma_{ef} \tan \varphi_{ef}$$

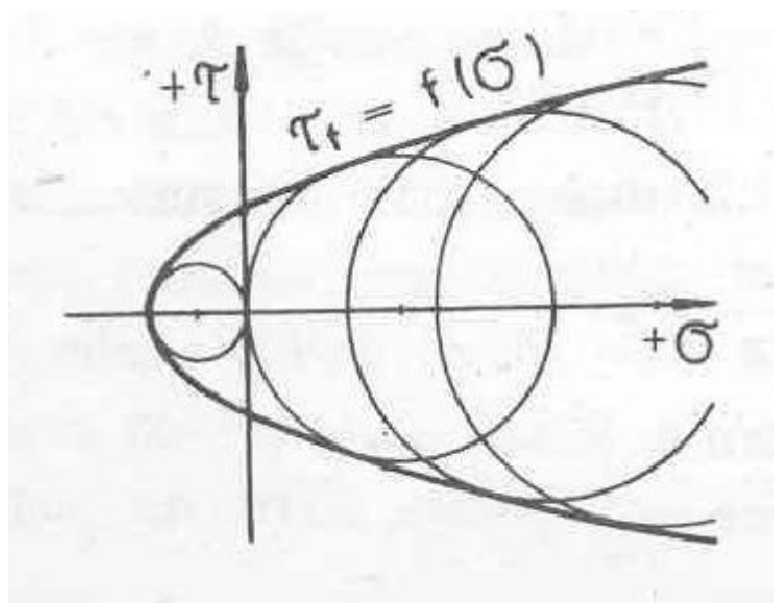


Obrázek č. 7: Coulombova čára pevnosti [1] (upraveno)

Další teorie popisující porušení zemin je Mohrova teorie. Podle Mohrovy teorie dojde k porušení materiálu tehdy, když maximální rozdíl mezi největším tangenciálním napětím a nějakou funkcí normálového napětí, charakteristickou pro daný materiál, klesne na nulu:

$$\max [\max |\tau| - f(\sigma)] = 0$$

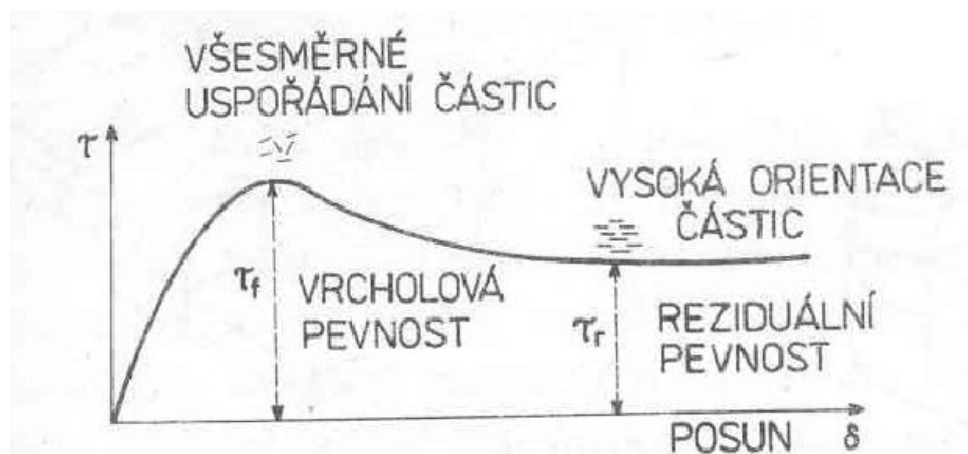
Funkci $f(\sigma)$ určuje Mohr experimentálně jako obalovou čáru kružnic napětí odpovídající stavům na mezi porušení materiálu. Pro zjištění smykových parametrů potřebujeme znát nejnižší a nejvyšší hlavní napětí pro stav porušení [3].



Obrázek č. 8: Smyková pevnost zeminy podle Mohra [3]

4.1 Vrcholová, kritická a reziduální smyková pevnost

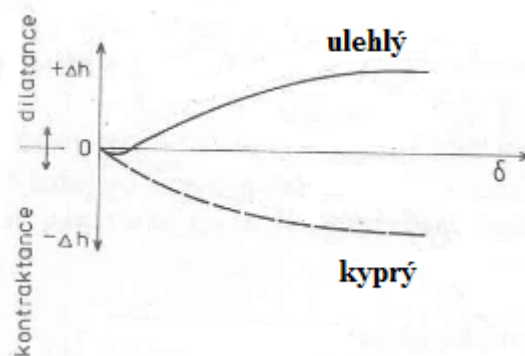
Ze současných poznatků mechaniky zemin a hornin vyplývá, že efektivní smyková pevnost hornin a většiny zemin (kromě nesoudržných) při určitém efektivním normálovém zatížení po dosažení maximální hodnoty, tzv. vrcholové pevnosti τ_f jejich smyková pevnost s dalšími přetvárnými vlastnostmi klesá až k minimální tzv. reziduální pevnosti τ_r [13] (obr. č. 9.)



Obrázek č. 9: Typický pracovní diagram smykového odporu na posunu [3]

Tento typický pokles smykové pevnosti po překročení její mezní hodnoty je charakteristický při křehkém porušení zemin a hornin s hustou strukturou, které odpovídají indexu křehkosti $I_B = (\tau_f - \tau_r) / \tau_f$ v rozsahu $0,1 < I_B < 1,0$. Dalším charakteristickým znakem křehkého porušení je dilatance, tj. zvětšování objemu zeminy nebo horniny při smykovém namáhání [13].

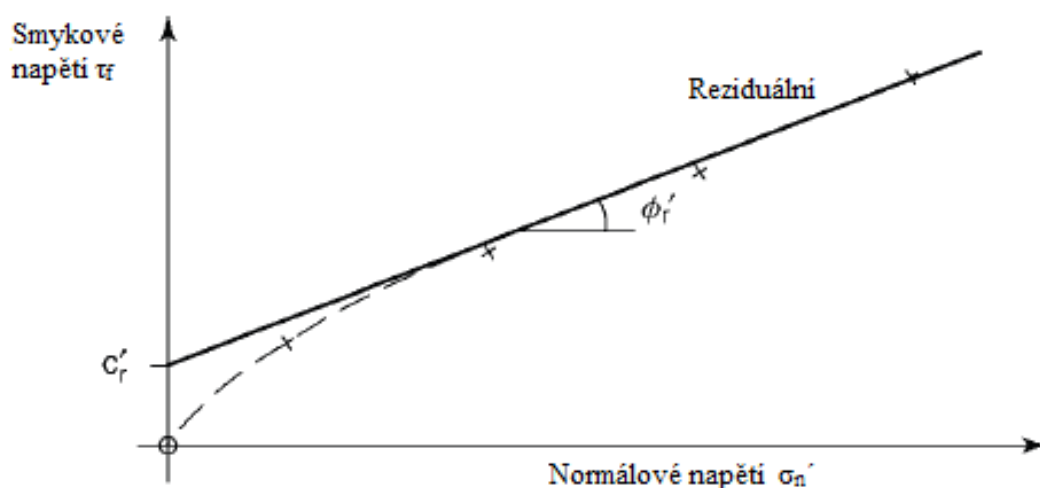
Rozdílným charakterem se vyznačují kypré, slabě konsolidované a plastické zeminy s volnou strukturou, kterým pevnost při smykovém namáhání po překonání jejich vrcholové smykové pevnosti při dalším přetváření klesá k reziduální hodnotě jen v malé míře, případně se už podstatně nemění, jejich stupeň křehkosti má hodnotu $I_B < 0,1$. Pokud je pro zeminu charakteristické plastické přetváření a porušení je provázáno zmenšováním jejich objemu jde o tzv. zápornou dilatanci neboli kontraktanci [13]. (obr. č. 10.)



Obrázek č. 10: Dilatance, kontraktance [3] (upraveno)

Pevnost ve smyku klesá pod vrcholovou hodnotu a jíl v úzké zóně přilehlé k rovině poruchy změkne a dosáhne kritického stavu. Avšak kvůli nerovnoměrnému namáhání ve vzorku je přesný bod křivky odpovídající kritickému stavu nejistý. Při pokračujícím stříhovém rozložení se pevnost ve smyku dále snižuje pod hodnotu kritického stavu a nakonec dosáhne zbytkové hodnoty při poměrně velkém posunutí. Pokud zemina obsahuje poměrně vysoký podíl deskových částic, dojde k přesměrování těchto částic rovnoběžně s rovinou porušení. Reorientace se ovšem nemusí projevit, jestliže částice podobné destičkám vykazují vysoké tření. Koncepce kritického stavu nevede ke kontinuální deformaci vzorku jako celku, zatímco v reziduálním stavu je preferovaná orientace nebo přemístění částic v úzké smykové zóně [6].

U rekonstituovaných vzorků nemůžeme stanovit vrcholovou smykovou pevnost, avšak je možné stanovit kritickou a reziduální smykovou pevnost. Nicméně při nízkých efektivních napětích není reziduální čára pevnosti lineární jak je znázorněno na obrázku č.11 přerušovanou křivkou. To znamená, že hodnota $c'_r = 0$ [1].



Obrázek č. 11: Typická čára pevnosti pro reziduální smykovou pevnost [1] (upraveno)

4.2 Základní typy standardních smykových zkoušek

Typy laboratorních zkoušek:

1. Smyková zkouška neodvodněná, nekonsolidovaná (typ UU), při níž nedochází k odvodnění vzorku a ani k poklesu pórového napětí ve vzorku. Dostaneme totální parametry smykové pevnosti c_u , ϕ_u [8]. Při této zkoušce v trojosém smykovém přístroji se používají nepropustné destičky, takže vzorek je nepropustně oddělen od svého okolí. Po zatížení komorovým tlakem se ihned může přikročit k vyvození deviátoru napětí. Vzorek se zatěžuje až do porušení. Křivka udávající vztah mezi deviátorem napětí a svislou deformací vzorku dosáhne svého vrcholu a začne klesat - vytvoří se zřetelná smyková plocha. Není-li dosažení maximálního zatížení patrné a vzorek se roztláčuje soudečkovitě do stran, pokládá se za maximální deviátor napětí ten, při němž svislá deformace vzorku dosáhla 20 % původní výšky vzorku [3].

2. Smyková zkouška konsolidovaná, odvodněná (typ CD), při níž je vzorek plně konsolidován a nanášení smykového napětí je tak pomalé, že velikost vnikajícího pórového tlaku se stačí rozptýlit na nulovou hodnotu. Výsledkem jsou efektivní parametry smykové pevnosti c_{ef} , ϕ_{ef} [3]. Tento typ zkoušky odpovídá zkoušce ve smykovém krabicovém přístroji, který byl využit pro účely této bakalářské práce. U jemnozrnných zemin je důležité nastavit takovou rychlost smýkání, aby došlo k disipaci pórových tlaků. Stanovení rychlosti předepisuje norma ČSN CEN ISO/TS 17892-10 [21].

Smyková krabicová zkouška

Historie

Zkouška pomocí smykové krabice byla pravděpodobně použita již v roce 1776 Coulombem. V roce 1846 francouzský inženýr Alexandre Collin použil dělicí krabice o délce 350 mm, ve kterém byl zkoušen vzorek hlíny o rozměrech 40 x 40 mm zatížený zavěšeným závažím. V roce 1915 v Británii Bell pracoval na dalším prototypu pokročilejšího zařízení. Jednoduché smykové zařízení s jednou smykovou rovinou bylo navrženo v roce 1934. Vyžadovalo ovšem velké zkušenosti s obsluhou zařízení. Moderní smykové zařízení bylo navrženo v roce 1946. Dodnes je většina komerčních přístrojů stále založena na smýkání s řízeným posunem. Metoda s řízeným napětím má určité výhody v některých dlouhodobých testech, ve kterých se napětí musí aplikovat velmi pomalu [20].

Princip

Zkouška pomocí smykového krabicového (čelistového) přístroje je nejstarší a nejjednodušší formou zkoušky pro zjištění efektivních smykových parametrů c_{ef} , φ_{ef} . Zkouška se používá pro měření okamžité nebo krátkodobé smykové pevnosti zeminy z hlediska celkového namáhání [20]. Je vhodná pro soudržné zeminy.

Průběh zkoušky je rozdělen na konsolidační a smykovou fázi. Závislost sedání během konsolidace na odmocnině času se stanoví rychlost smýkání [14]. Ta musí být dostatečně malá, aby se pórový tlak vznikající změnou napjatosti stihl rozptýlit [3].

3. Smyková zkouška konsolidovaná, neodvodněná, s měřením pórového tlaku (typ CIUP, CAUP). Vzorek zeminy je konsolidován na jistý stav napětí a usmýknut při jiném napětí. Při této zkoušce měříme navíc pórový tlak. Veškeré systémy odvodnění jsou během smykání uzavřené. Pórový tlak se měří u jednoho z čel zkušebního vzorku. Dostaneme jak totální, tak efektivní parametry pevnosti [8]. U této zkoušky musí být alespoň jedna spodní destička propustná. Přístup ke zkoušce se liší podle toho, zda je vzorek nasycený, nebo jen částečně nasycený vodou [3].

Tabulka č. 3: Přehled základních laboratorních zkoušek [14]

Typ zkoušky mezinárodní označení	Název zkoušky (symbol)	Výsledné parametry smykové zkoušky	Zemina	Typ smykového přístroje
UU	Nekonsolidovaná U Neodvodněná U	φ_u, c_u	Soudržná	Triaxiální přístroj
CIUP	Konsolidovaná C Izotropně I Neodvodněná U S měřením pórového tlaku P	φ_{cu}, c_{cu} φ_{ef}, c_{ef}	Soudržná	Triaxiální přístroj (zkoušky dlouhodobé, 1-2 týdny). Je vhodný triax. přístroj
CAUP	Konsolidovaná C Anizotropně A Neodvodněná U S měřením pórového tlaku P	φ_{cu}, c_{cu} φ_{ef}, c_{ef}	Soudržná	Triaxiální přístroj (zkoušky dlouhodobé, 1-2 týdny). Je vhodný triax. přístroj
CD	Nekonsolidovaná U Odvodněná D	φ_{ef}, c_{ef}	Nesoudržná	Smykový krabicový přístroj

4.3 Smykové přístroje

Ke stanovení smykové pevnosti zemin v laboratoři se používají různé druhy přístrojů. V této kapitole budou uvedeny: prostý tlakový přístroj, triaxiální smykový přístroj, krabicový (čelistový) přístroj a kruhový smykový přístroj. Každý z nich je specifický a vhodný pro určitý typ zemin.

1. Prostý tlakový přístroj

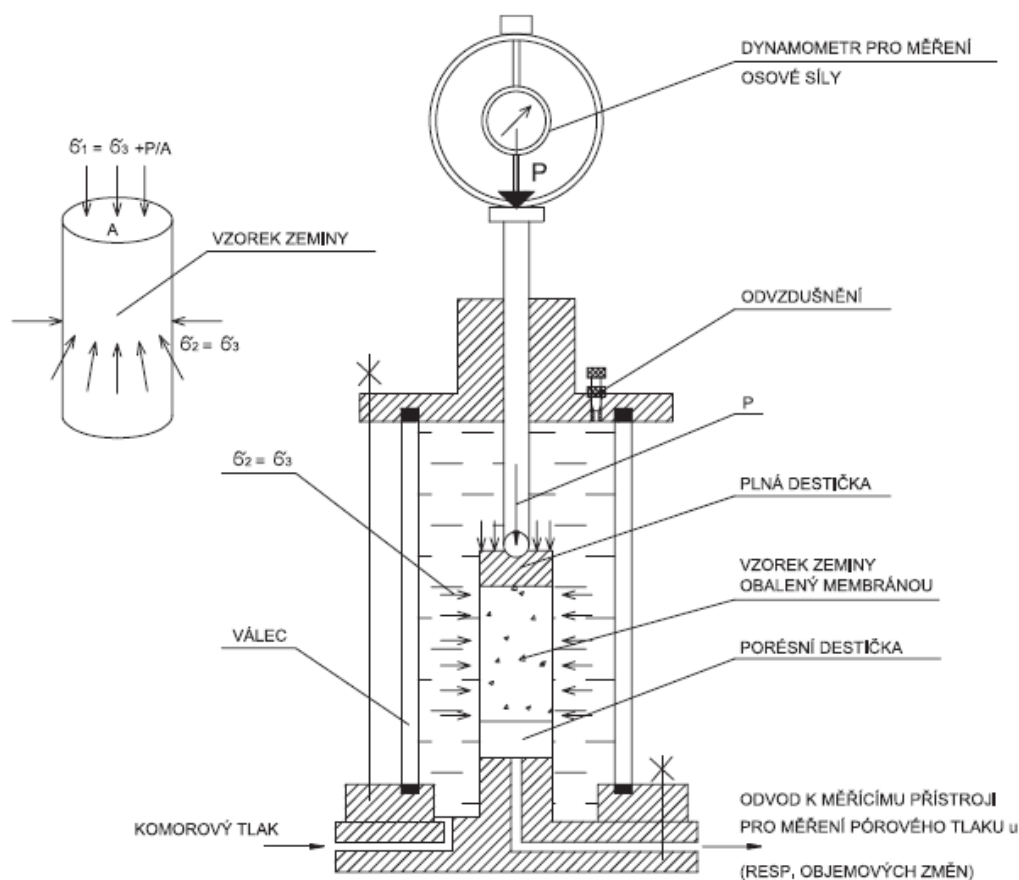
Tato neodvodněná, nekonsolidovaná zkouška je vhodná zejména pro vodou nasycené jíly a jílovité zeminy. Slouží ke zjištění totální pevnosti vyjádřené hodnotou c_u , za podmínky že, $\varphi_u = 0^\circ$ [14]. Vzorek zeminy má tvar hranolu nebo válce a působí na něj normálové σ , které při porušení dosáhne σ_{\max} [28].



Obrázek č. 12: Vzorek zkoušený v prostém tlakovém přístroji [29].

2. Triaxiální smykový přístroj

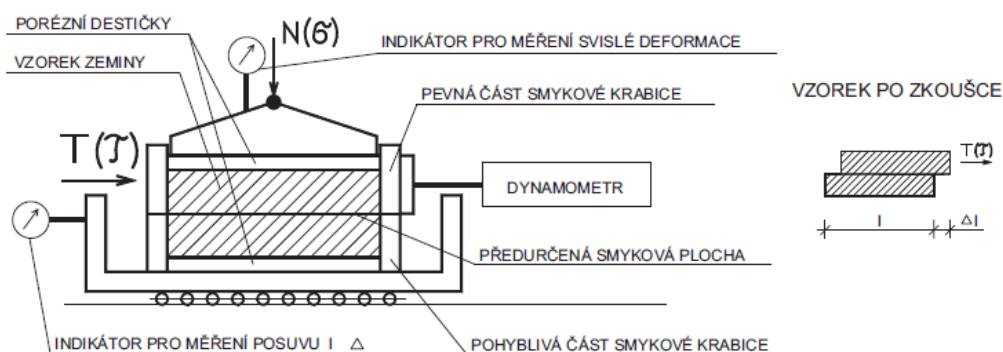
Vzorky mají tvar válce, dodržuje se poměr výšky k průměru 2:1. Vzorek je osazen na spodní podstavu komory. Podle druhu zkoušky jsou podstavy propustné nebo nepropustné. Před uzavřením komory se usadí vrchní destička o průměru vzorku, přetáhne se pryžová membrána, která se utěsní k podstavám pryžovými kroužky. Součástí komory je píst, jehož prostřednictvím se u standardní zkoušky vzorek přitěžuje deviátorem napětí, až dojde k porušení [3].



Obrázek č. 13: Schéma triaxiálního smykového přístroje (komora) [14].

3. Krabicový smykový přístroj

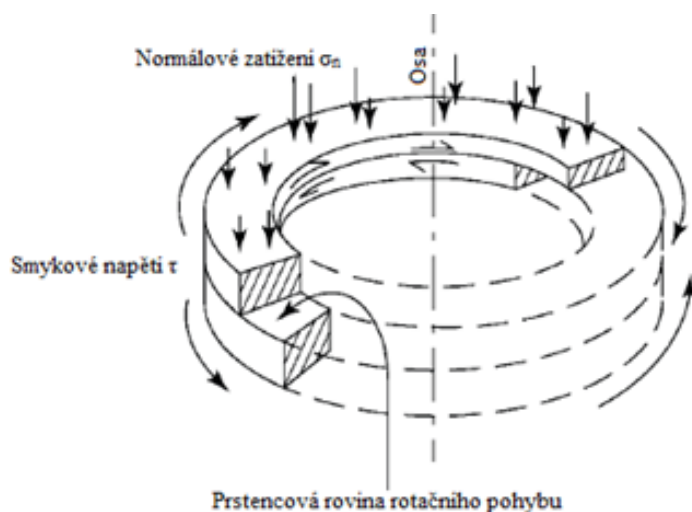
Vzorek zeminy je vložen do přístroje mezi pohyblivou a pevnou část smykové krabice (obr. č. 14). Mezi vzorek a krabici se shora i zespodu umístí propustné porézní destičky a filtrační papíry. Vzorek je zatížen a takto je ponechán v krabici, aby měl možnost konsolidovat. Délka konsolidace závisí na typu zeminy a výrazně se u jednotlivých typů liší. Například u písků je doporučená doba konsolidace ve smykovém přístroji pouze cca 60 minut, zatímco u vysoce plastických jílů je doporučeno 24 hodin [14].



Obrázek č. 14: Schéma krabicového smykového přístroje [14]

4. Kruhový smykový přístroj

Vhodným způsobem zkoumání reziduální pevnosti u jílů je pomocí rotační smykové zkoušky. Vzorek v prstenci je za daného normálového napětí namáhán ve vodorovné rovině rotací jedné poloviny zařízení vzhledem k druhému (obr. č. 15.). Rychlost rotace musí být dostatečně pomalá, aby se zajistilo, že vzorek zůstane v odvodněném stavu [6].



Obrázek č. 15: Princip rotační smykové zkoušky [1] (upraveno)

5. Laboratorní měření

Laboratoř, ve které byly všechny zkoušky provedeny, se nachází na Fakultě stavební Vysoké školy báňské – Technické univerzitě v Ostravě.

5.1 Popis vzorků

Laboratornímu měření byly podrobeny dvě různé třídy kvality vzorků zemin. Jeden porušený a druhý neporušený.

Vzorky musí obsahovat všechny minerální složky vrstvy, z nich byly odebrány. Nesmí být znečištěny jakýmkoliv materiálem ani příměsemi použitými při odběru vzorku.

Vzorky pro laboratorní zkoušky se dělí do pěti kvalitativních tříd, s ohledem na vlastnosti zeminy o nichž se předpokládá, že zůstaly nezměněny během odběru vzorku a manipulace s ním, dopravy a skladování. Třídy jsou použity v Tabulce č. 4 společně s použitou kategorií vzorkování [18].

Tabulka č. 4: Třídy kvality vzorků zemin pro laboratorní zkoušky a použité kategorie odběru vzorku [18]

Vlastnosti zeminy	Třída kvality				
Vlastnosti zeminy zachované beze změny	1	2	3	4	5
<i>Zrnitost</i>	○	○	○	○	
<i>Vlhkost</i>	○	○	○		
<i>Ulehlost, relativní hutnost, propustnost</i>	○	○			
<i>Stlačitelnost, smyková pevnost</i>	○				
Vlastnosti, které mohou být stanoveny					
<i>Vrstevní sled</i>	○	○	○	○	○
<i>Hranice vrstvy – hrubé</i>	○	○	○	○	
<i>Hranice vrstvy – jemné</i>	○	○			
<i>Atterbergovy meze, zdánlivá hustota částic, obsah organických látek</i>	○	○	○	○	
<i>Vlhkost</i>	○	○	○		
<i>Ulehlost, relativní hutnost, propustnost</i>	○	○			
<i>Stlačitelnost, smyková pevnost</i>	○				
Kategorie vzorkování podle ČSN EN ISO 22475-1 [27]	A				
	B				
				C	

Vzorek „K“ z obce Klimkovice - Porušený vzorek (třída kvality 4 dle ČSN EN 1997-) [18].

Struktura zeminy ve vzorku je zcela změněna. Celkové uspořádání odlišných vrstev nebo složek je narušeno tak, že není možné vrstvy in situ přesně rozlišit. Vlhkost vzorku nemusí být reprezentativní.

Vzorek použitý pro laboratorní měření byl odebrán jako porušený v oblasti Klimkovice z pod základu rodinného domu.

Vzorek „S“ z obce Prostřední Suchá - Neporušený vzorek (třída kvality 1 dle ČSN EN 1997-) [18].

Záměrem při procesu odbírání a manipulaci je získat vzorek neporušený nebo pouze mírně porušený. Nedochází k žádné změně složek nebo chemického složení zeminy. Vlhkost a číslo pórovitosti odpovídají hodnotám in situ. Neočekávané okolnosti, jako jsou změny v geologické vrstvě, mohou vést ke snížení kvality získaných vzorků.

Vzorek použitý pro laboratorní měření byl odebrán jako neporušený v oblasti Prostřední Suchá, z hloubky jednoho metru.

5.2 Popis provedených zkoušek

Tato kapitola popisuje postupy jednotlivých zkoušek, které byly provedeny u obou vzorků. Zkoušení probíhalo v laboratoři a postupy byly prováděny pomocí platných norem.

5.2.1 Stanovení zrnitosti zemin

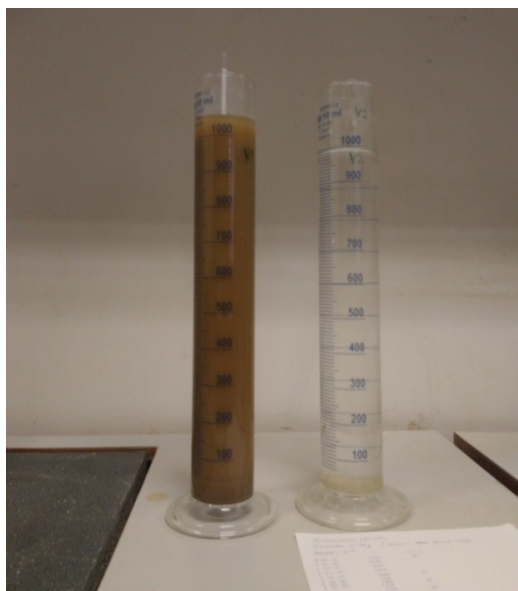
Dle ČSN EN ISO 17892-4 [24].

Zrnitost je jedna z nejdůležitějších fyzikálních vlastností zemin a poskytuje popis zeminy založený na rozdělení zrn do jednotlivých frakcí. Pro stanovení zrnitosti zemin s obsahem jemných zrn menším než 10 % je vhodná metoda proséváním pomocí kontrolní sady sít a pro zeminy, které obsahují více, než 10 % jemné frakce se používají metody sedimentace, nejčastěji tzv. zkouška hustoměrná nebo pipetovací.

Protože se dle hmatové a vizuální zkoušky u obou zemin předpokládalo vysoké procentuální zastoupení jemné frakce, byla pro vybrané vzorky použita mokrá síťová zkouška a hustoměrná zkouška pro určení plynulé křivky zrnitosti zemin. Suchá síťová zkouška je pro jemnozrnné zeminy jednoznačně nevhodná.

Nejprve bylo nutné zvážit všechna prázdná síta. Připravený suchý vzorek byl zvážen a ponořen do vody na 2 hodiny. Poté se důkladně rozmíchal a mokrým síťovým rozbořem byla oddělena zrna $< 0,063$ mm. Aby nedošlo k přetížení tohoto síta, byl vzorek promýván přes síta s velikostí ok nejen 0,063 mm, ale i přes síta 0,5 mm, 1 mm a 2 mm. Podsítný materiál byl zachycen a použit na hustoměrný rozbor. Všechna síta se vzorkem se vysušila a vysušený materiál byl podroben suchému síťovému rozboru. Zbytky na sítích se následně zvážily a jejich podíl byl vyjádřen v hmotnostních procentech.

Hustoměrná metoda vychází ze Stokesova zákona. Průměry zrn určujeme na základě rychlosti usazování ve vodě (obr. č. 16).



Obrázek č. 16: Odměrné válce při provádění hustoměrné zkoušky

Podsítná zemina, tedy zrna menší než 0,063 mm, byla promíchána s disperzním činidlem, aby došlo k úplnému rozptýlení zrn zeminy. Připravená suspenze byla přemístěna do odměrného válce a doplněna destilovanou vodou do 1 l, a nechala se odstát po dobu 12 hodin. Suspenze se zeminou byla intenzivně promíchávána, dokud se nedosáhlo dokonalého rozptýlení. Poté se do válce ponořil hustoměr a spustil se čas na předem připravených stopkách. V krátkých intervalech se provedlo čtení hustoměru R'_h na horním okraji menisku s přesností na 0,001 g/ml. Hustoměr se vytáhnul a vložil do válce s referenčním roztokem a provedlo se čtení R_0 . Pro každé další čtení se vložil hustoměr do válce. Teplota suspenze byla změřena v prvních 15 minutách a pak při každém dalším čtení. Potom bylo nutné provést kalibraci hustoměru dle normy ČSN EN ISO 17892-4 [24].

Po ukončení hustoměrné zkoušky byla získána veškerá data k vykreslení křivky zrnitosti, jejíž každý bod udává, kolik procent z celkové hmotnosti vzorku činí hmotnost všech zrn menších než určitý průměr zrna v mm.

5.2.2 Stanovení zdánlivé hustoty pevných částic

Dle ČSN EN ISO 17892-3 [23].

Zkouška byla provedena pomocí pyknometru vybaveného zátkou s kapilární trubičkou.

Nejprve byl suchý a čistý pyknometr zvážen na váze s přesností 0,001g (m_0). Následně byl do jedné třetiny pyknometru přemístěn vysušený vzorek frakce do 0,125 mm a znovu zvážen (m_2). Do tří čtvrtin byl doplněn destilovanou vodou a po dobu 15 minut se jemně vařil (obr. č. 18). Po ochlazení na pokojovou teplotu a doplnění destilovanou vodou až po okraj se uzavřel zátkou s kapilárou tak, aby v celém pyknometru nebyl uzavřen vzduch a znovu se stanovila hmotnost (m_3). Hmotnost (m_1) byla stanovena zvážením pyknometru s pomocnou kapalinou, v našem případě destilovanou vodou (ρ_w).

Hustota pevných částic byla stanovena z následující rovnice:

$$\rho_s = \frac{m_2 - m_0}{(m_1 - m_0) - (m_3 - m_2)} \times \rho_w$$

m_0 – hmotnost suchého pyknometru (g)

m_1 – hmotnost pyknometru zcela naplněného pomocnou kapalinou (g)

m_2 – hmotnost suchého pyknometru s vysušeným vzorkem (g)

m_3 – hmotnost pyknometru, naplněného saturovaným vzorkem a pomocnou kapalinou (g)

ρ_w – hustota pomocné kapaliny (gcm^{-3})



Obrázek č. 17: Pyknometr při zahřívání

5.2.3 Stanovení meze tekutosti

Dle ČSN CEN ISO/TS 17892-12 [25].

Mez tekutosti je vlhkost, při které zemina přechází se stavu tekutého do stavu plastického. Tato vlhkost byla stanovena dvěma metodami, pomocí kuželové zkoušky a Casarandeho misky.

- ***Kuželová zkouška.***

Pro zkoušku byl použit kužel o hmotnosti 80 g a vrcholovém úhlu 30° . Vzorek zeminy, který zůstal na síti o průměru oka 0,4 mm se důkladně promíchal s destilovanou vodou až do stavu homogenní pasty tak, až se všechna zrna rovnoměrně obalila vodou. Takto připravený vzorek se nechal 24 hodin uležet. Následně byla zemina rozetřena do misky, takovým způsobem, aby byl vzorek bez vzduchových bublin a povrch se zarovnal s okrajem misky. Nádoba se umístila pod penetrační kužel, který se nastavil tak, aby jeho hrot byl v těsném kontaktu se zeminou. Na stupnici přístroje se odečetlo počáteční čtení výšky kužele s přesností na 0,1 mm. Po zapnutí přístroje se kužel nechal padat do zeminy po dobu 5 vteřin, poté se zaznamenala hodnota zaboření. Rozdílem mezi těmito dvěma hodnotami se stanovila hloubka penetrace. Toto měření bylo provedeno na jednom vzorku

tříkrát po sobě a každé z těchto třech čtení se od sebe nelišilo o více než jeden milimetr. Po ukončení byl odebrán vzorek zeminy pro stanovení vlhkosti. Celý postup byl opakován při různých vlhkostech zeminy.

Výsledkem je graf závislosti vlhkosti zeminy a penetrací kužele v semilogaritmickém měřítku. Těmito body se proloží přímka. Vlhkost na mezi tekutosti odpovídá hloubce zaboření kužele o velikosti 20 mm.



Obrázek č. 18: Kužel pro měření penetrace

- ***Casagrandeho přístroj***

Vzorek zeminy byl promísený s destilovanou vodou a pomocí stěrky byl umístěn do suché a čisté misky přístroje, tloušťka nepřesahovala jeden centimetr. Do zeminy uhlazené, rovnoběžné s podkladovou deskou se vyřízla normovaným nožem rýha, která koláček zeminy rozdělila na dvě poloviny. Miska Casagrandeho přístroje se nechala volně dopadat na podkladní desku z výšky 10 mm rychlostí dvou poklepů za vteřinu, dokud se obě poloviny nespojily na délku přibližně 12,5 mm. Zaznamenal se konečný počet úderů. Po vykonání zkoušky se odebral vzorek pro stanovení vlhkosti. Celý postup byl opakován při různých vlhkostech zeminy.

Výsledkem je graf závislosti mezi vlhkostí a příslušným počtem úderů v semilogaritmickém měřítku. Těmito body se proloží přímka. Stanoví se vlhkost na mezi tekutosti, která odpovídá 25 úderům Casagrandeho miskou.



Obrázek č. 19: Casagrandeho miska [2]

5.2.4 Stanovení meze plasticity

Dle ČSN CEN ISO/TS 17892-12 [25].

Mez plasticity je vlhkost, při které zemina přechází ze stavu pevného do stavu plastického.

Do zeminy frakce menší než 0,5 mm se přidalo malé množství vody a zformovala se kulička. Ta se rozdělila na dvě poloviny a z každé se na skleněné podložce vytvářely válečky o průměru 3 mm. Pokud se po dosažení 3 mm váleček drolil na 8 - 10 mm dlouhé části, byl odebrán vzorek na vlhkost. Tento postup byl opakován ještě třikrát. Ze získaných hodnot je spočítán průměr a tato hodnota odpovídá vlhkosti na mezi plasticity.

5.2.5 Smyková krabicová zkouška

ČSN CEN ISO/TS 17892-10 [21].

Po spuštění přístroje pohyblivá část krabice smýká vzorek v horizontálním směru určenou rychlostí. V intervalu dvou minut se zaznamenávala působící smyková síla a vodorovný a svislý smykový posun. V našem případě probíhalo smýkání u vzorku „K“ do dosažení posunu 10 mm, a u vzorku „S“ bylo měření ukončeno při posunu 15 mm. Poté byl vzorek otočen a smýkán dál. Toto se opakovalo, dokud se smykový odpor neustálil na hodnotě reziduální.

Smykový odpor zeminy je standardně zjišťován na čtyřech stejně hodnotných vzorcích, pro čtyři různá normálová napětí [14]. Avšak nám pro spolehlivé určení postačí tři vzorky s normálovým napětím 50, 100 a 200 kPa.



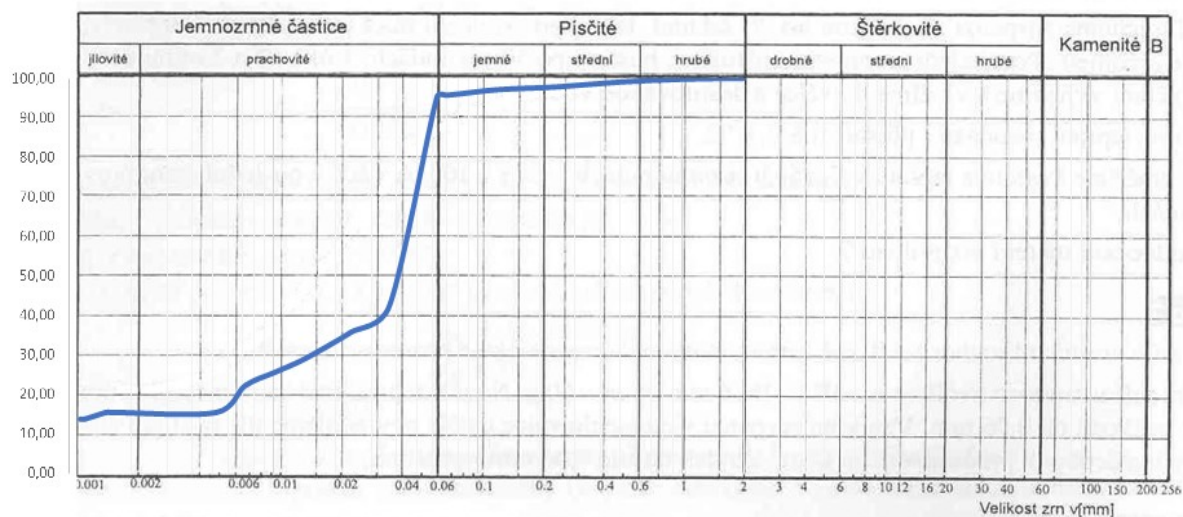
Obrázek č. 20: Použitý smykový krabicový přístroj

5.3 Vyhodnocení

Vzorek K

Na základě zrnitostní analýzy byl vzorek klasifikován dle:

- ČSN EN ISO 14688 -1 [26]: clSi (hlína jílovitá)
- ČSN 73 6133 [22]: CL (jíl s nízkou plasticitou)



Obrázek č. 21: Křivka zrnitosti vzorku „K“

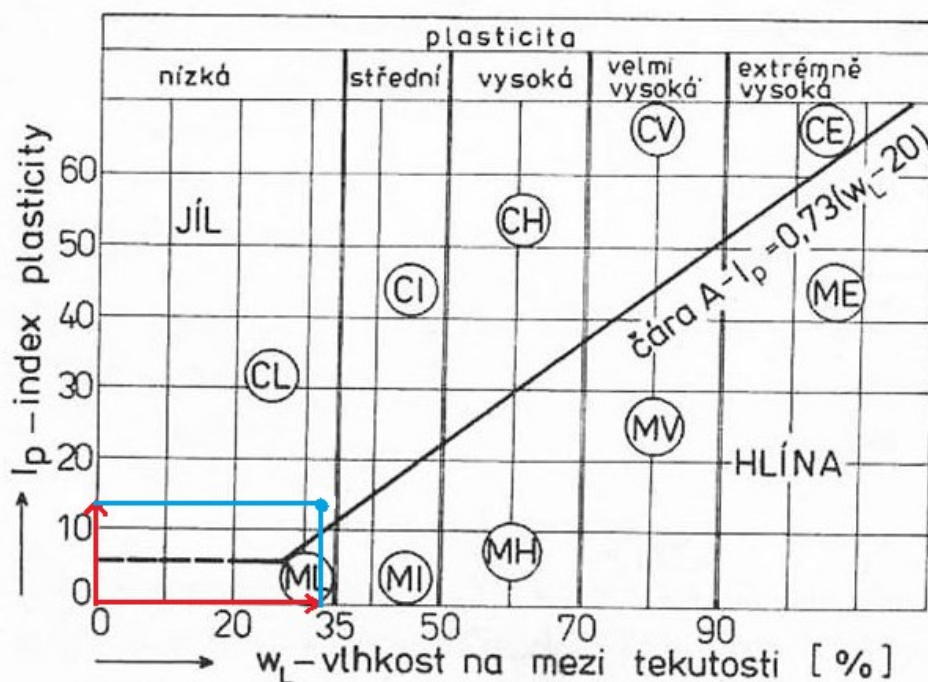
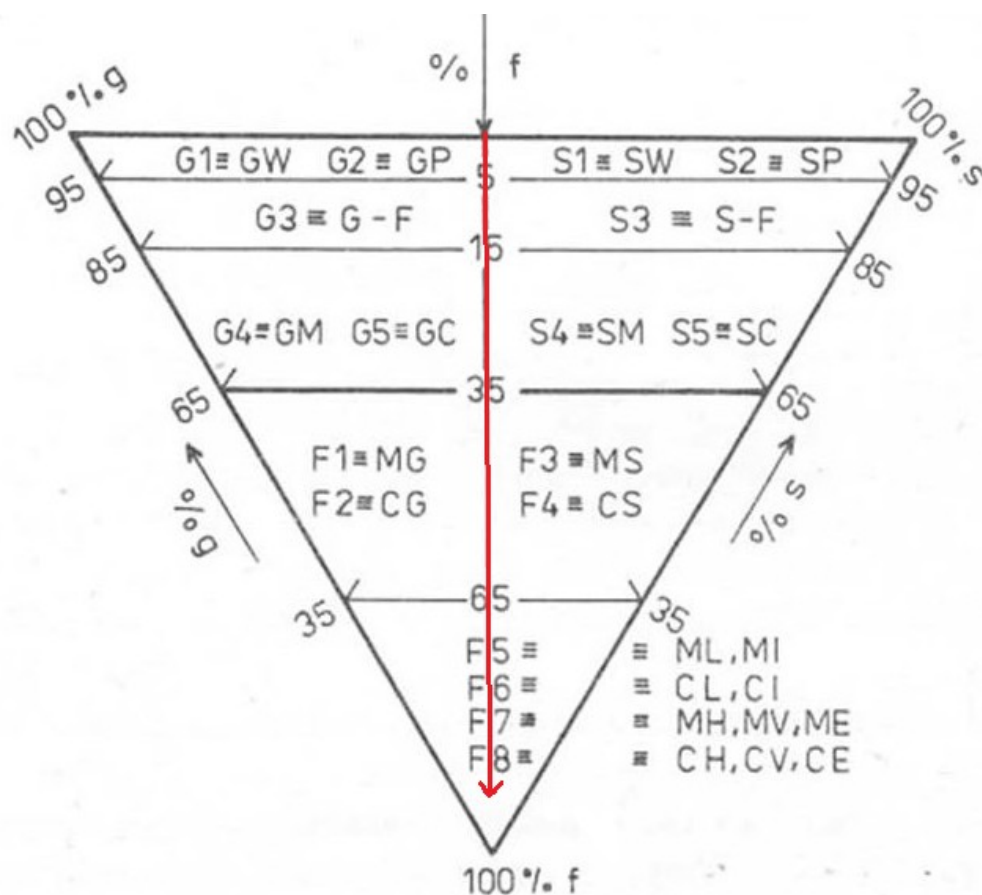
Procentuální zastoupení frakcí:

Štěrkovitá frakce $63 \text{ mm} \div 2 \text{ mm} \rightarrow 0\%$

Písečná frakce $2 \text{ mm} \div 0,063 \text{ mm} \rightarrow 4,7\%$

Jemnozrná frakce $< 0,063 \text{ mm} \rightarrow 95,3\%$

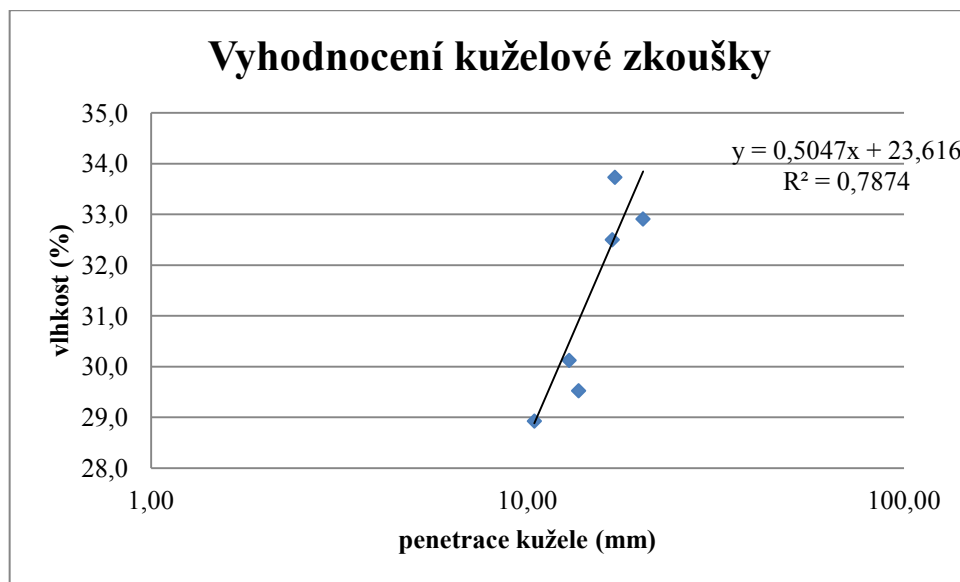
Obsah jílových částic $< 0,002 \text{ mm} \rightarrow 15,2\%$



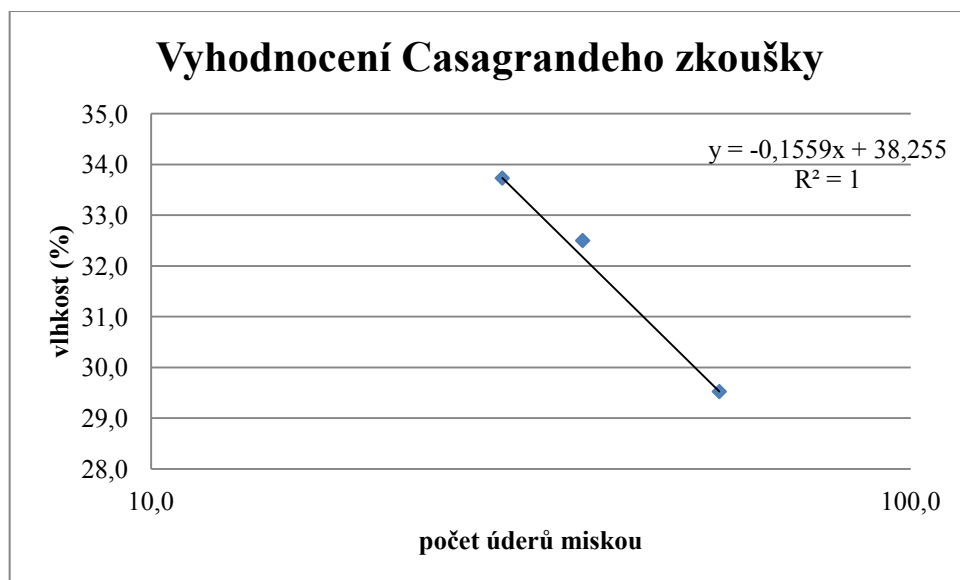
Obrázek č. 23: Zařizovací diagramy dle ČSN 73 6133 vzorku „K“

U vzorku „K“ (z Klimkovic) byla pomocí pyknometrické zkoušky stanovena zdánlivá hustota pevných částic $2,546 \text{ g/cm}^3$.

Vlhkost na mezi tekutosti byla měřena dvěma způsoby, kuželovou zkouškou a Casagrandeho miskou.



Graf č. 1: Vyhodnocení kuželové zkoušky vzorku „K“, $w_L = 32,8 \%$



Graf č. 2: Vyhodnocení Casagrandeho zkoušky vzorku „K“, $w_L = 34,4 \%$

Po vyhodnocení kuželové zkoušky u vzorku „K“ byla vlhkost na mezi tekutosti stanovena na $32,8 \%$, a u Casagrandeho misky na $34,4\%$. Vlhkosti na mezi plasticity odpovídá

průměrná hodnota 19,4 %. Z těchto dvou vlhkostí byl určen index plasticity, který má hodnotu 13,4 %. Původní vlhkosti vzorku odpovídá hodnota $w = 16,7$ %. Index konzistence byl stanoven na 1,2.

Smyková zkouška

Jelikož byl vzorek odebrán jako porušený a v laboratoři byl rekonstituován, zhutněn pomocí Proctra modifikovaného, nebylo možné u vzorku stanovit vrcholovou smykovou pevnost. Vzhledem k posunutí vzorku po smykové ploše jen o 10 mm nebylo možné určit ani reziduální smykovou pevnost. Tyto dvě pevnosti byly určeny u vzorku „S“

Důležitou součástí smykové zkoušky bylo stanovení rychlosti smýkání (graf č. 3). Vzorek byl zatížen a sledovalo se stlačení v určitých časových intervalech. Výsledky se vyhodnotily pomocí Taylorovy metody [21]:

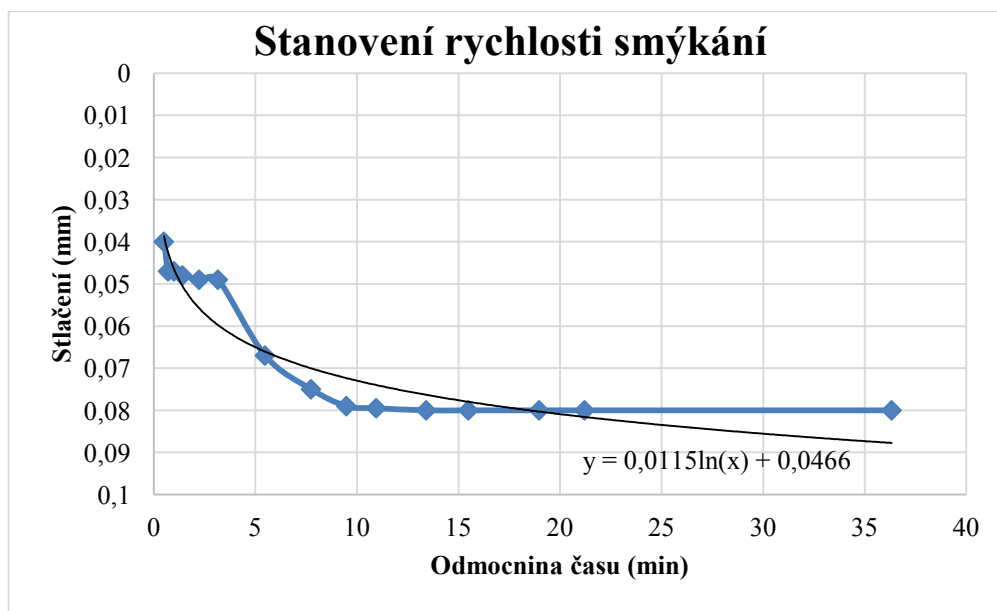
$$t_f = t_{100} \times 12,7$$

$$v_{\max} = \frac{s}{t_f}$$

v_{\max} – maximální rychlost smýkání (mm/min)

s – předpokládaná smyková deformace při porušení (mm)

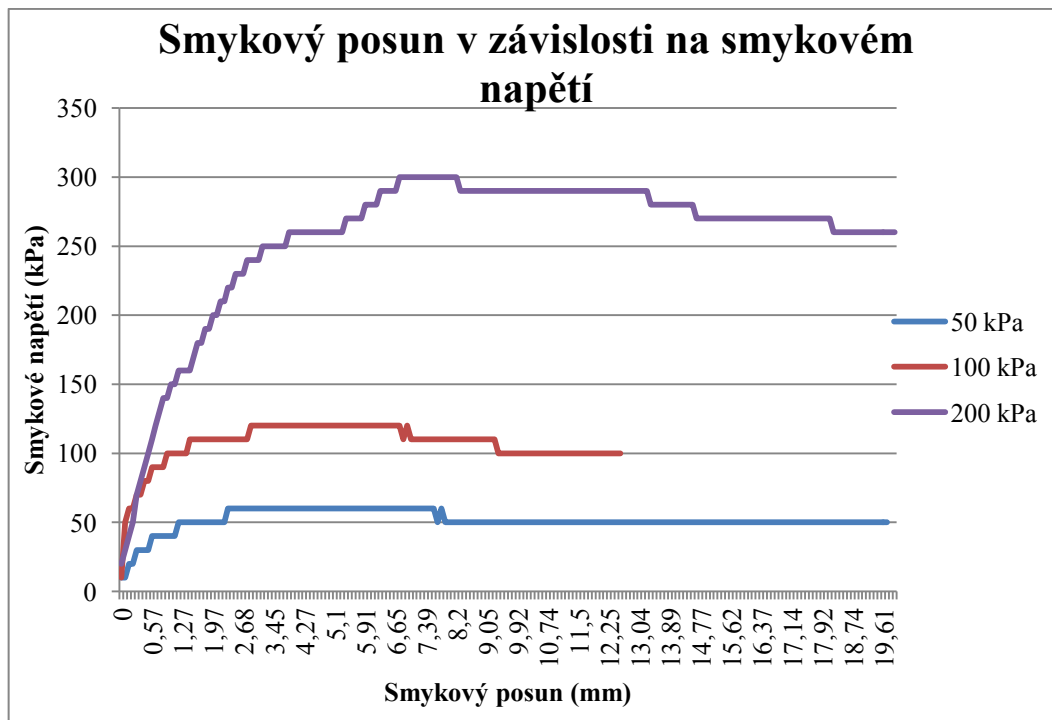
t_f – doba porušení (min)



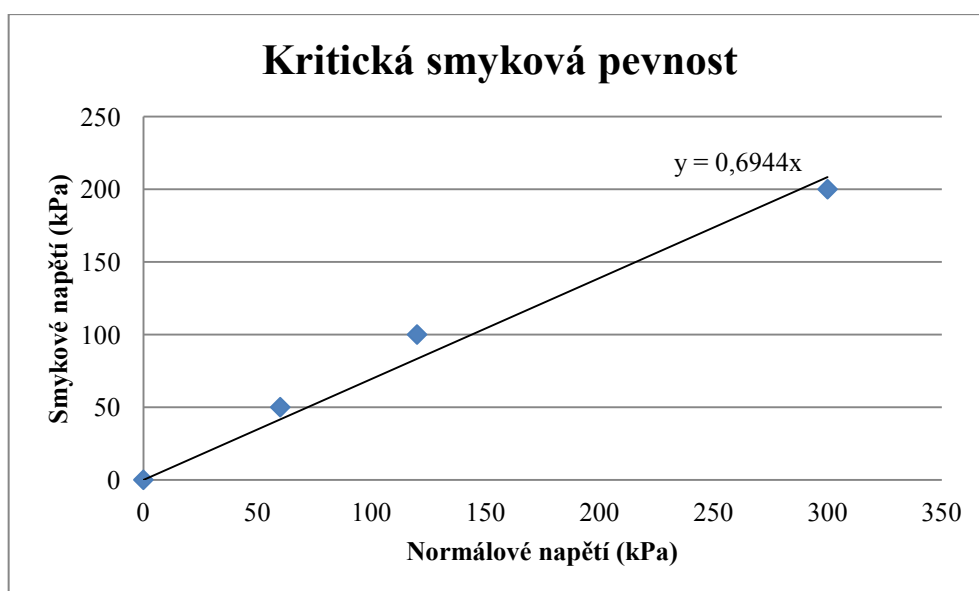
Graf č. 3: Stanovení rychlosti smýkání vzorku „K“

U tohoto vzorku byla rychlost smýkání stanovena 0,05 mm/min. Touto rychlostí byly smýkány všechny vzorky.

Pro stanovení kritické smykové pevnosti u vzorku „K“ bylo provedeno smýkání pro tři různá normálová napětí (50, 100, 200 kPa). Výsledné křivky jsou znázorněny v grafu č. 4. Je vidět že největšího smykového napětí dosahoval vzorek pod zatížením 20 kg.



Graf č. 4: Smykový posun v závislosti na smykovém napětí vzorku „K“



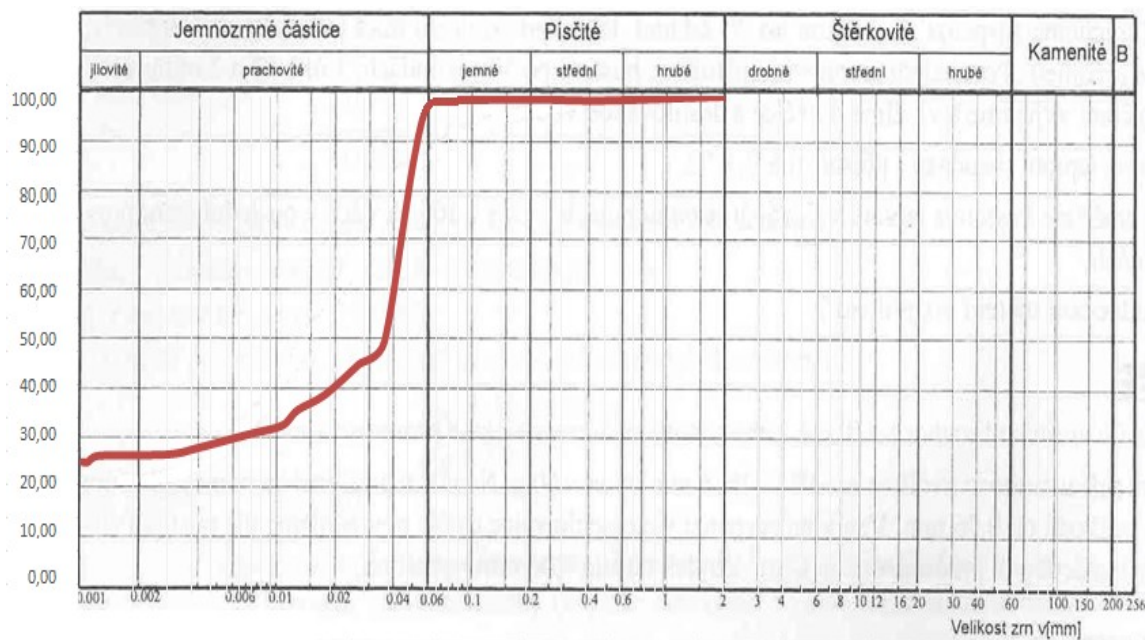
Graf č. 5: Čára kritické smykové pevnosti vzorku „K“

U této zeminy je kritický efektivní úhel vnitřního tření $\varphi' = 35^\circ$ a soudržnost $c' = 0$.

Vzorek S

Na základě zrnitostní analýzy byl vzorek klasifikován dle:

- ČSN EN ISO 14688 -1 [26]: siCl (jíl hlinitý)
- ČSN 73 6133 [22]: CI (jíl se střední plasticitou)



Obrázek č. 24: Křivka zrnitosti vzorku „S“

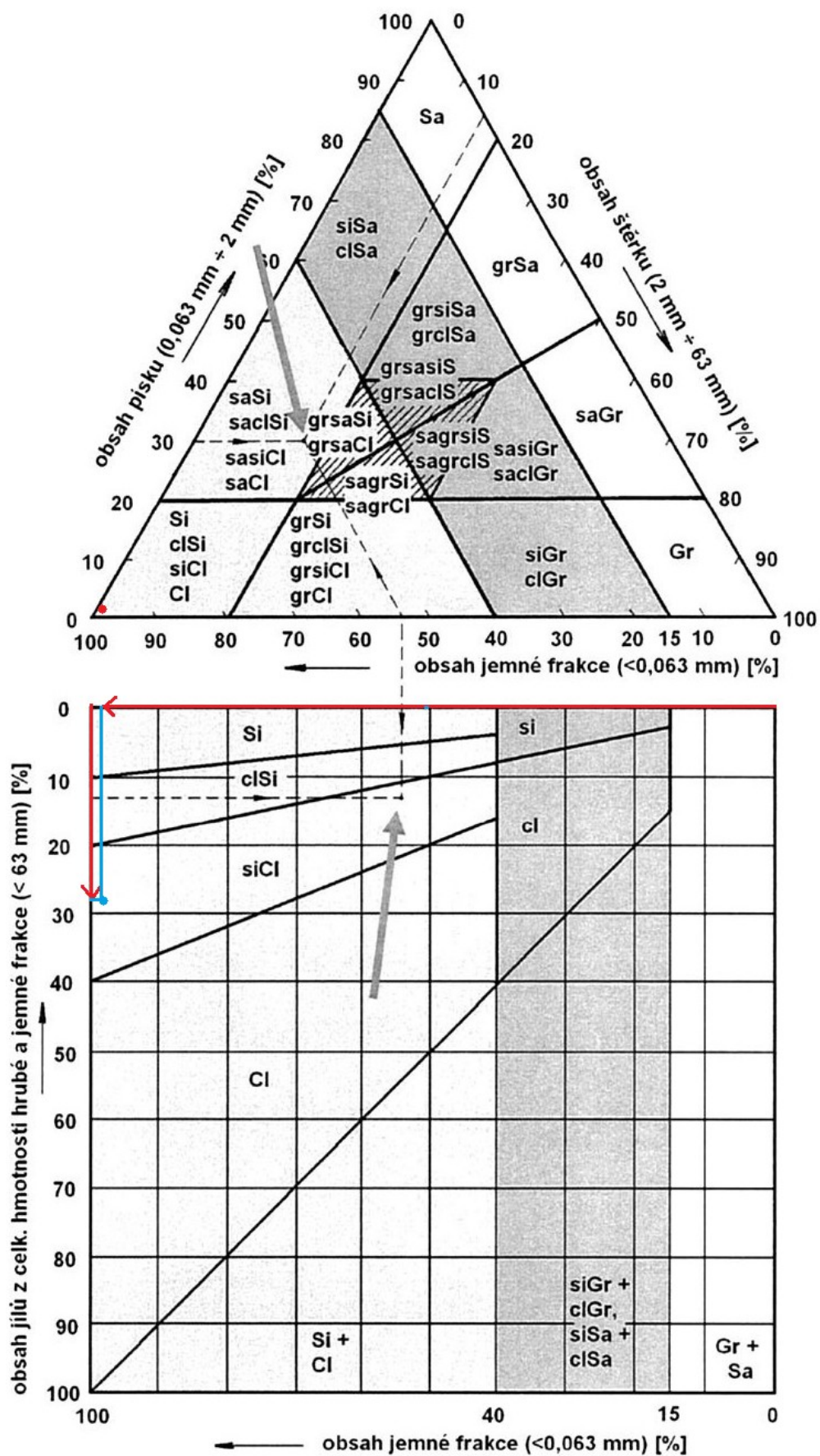
Procentuální zastoupení frakcí:

Štěrkovitá frakce $63 \text{ mm} \div 2 \text{ mm} \rightarrow 0\%$

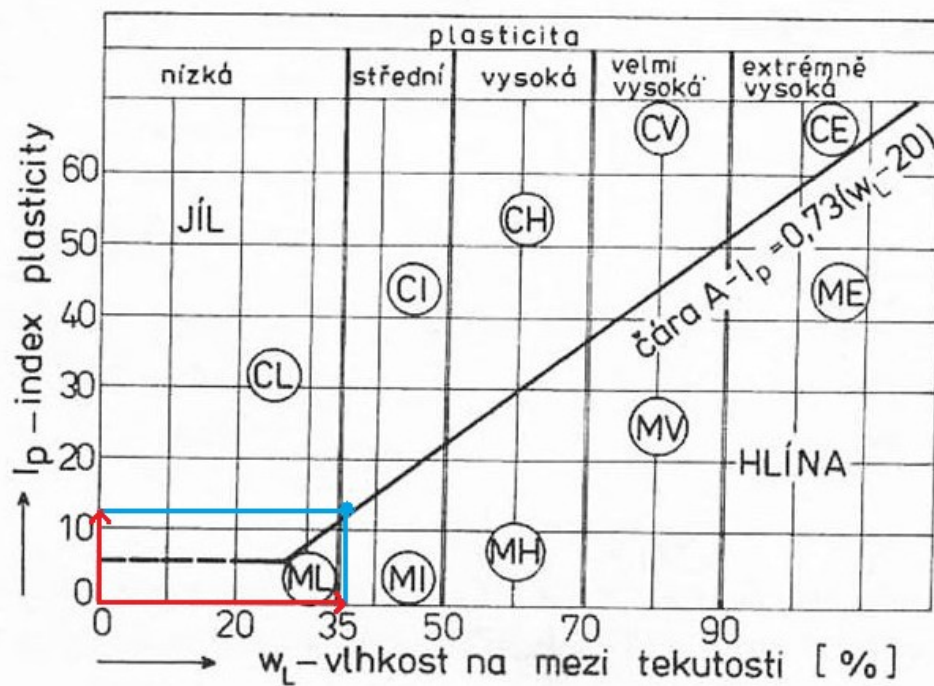
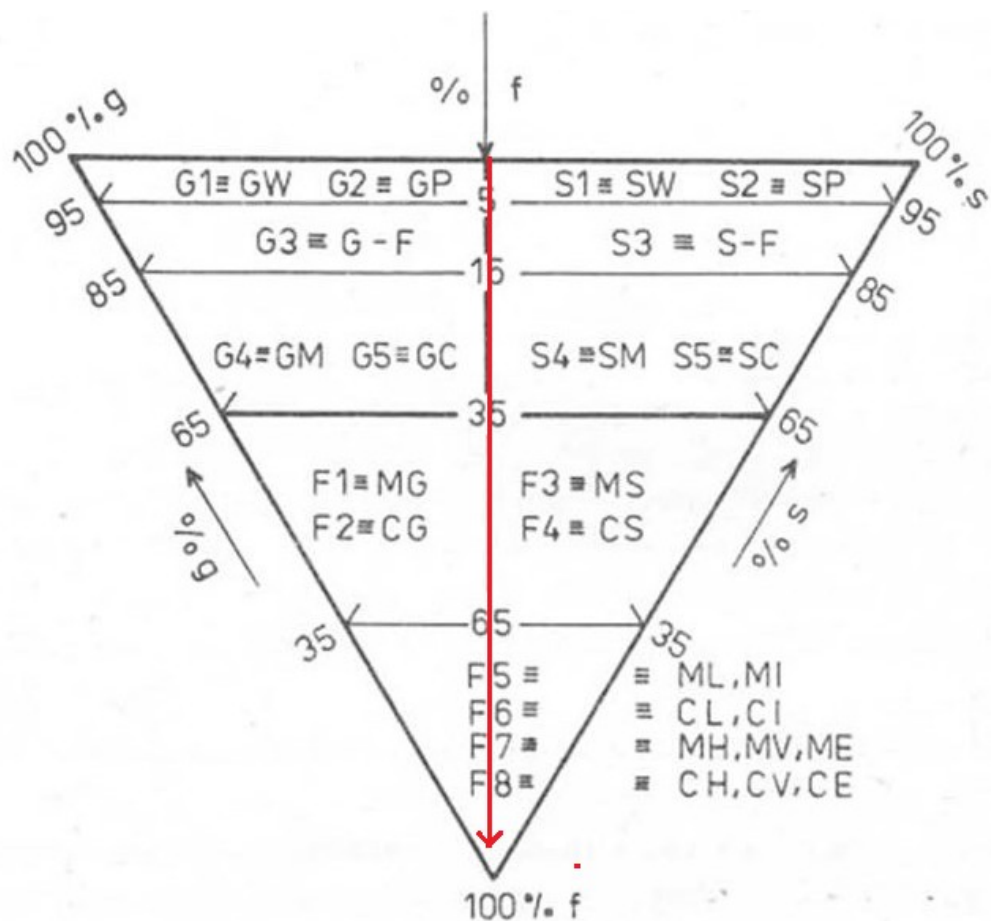
Písečná frakce $2 \text{ mm} \div 0,063 \text{ mm} \rightarrow 1,1\%$

Jemnozrná frakce $< 0,063 \text{ mm} \rightarrow 98,9\%$

Obsah jílových částic $< 0,002 \text{ mm} \rightarrow 27,8\%$



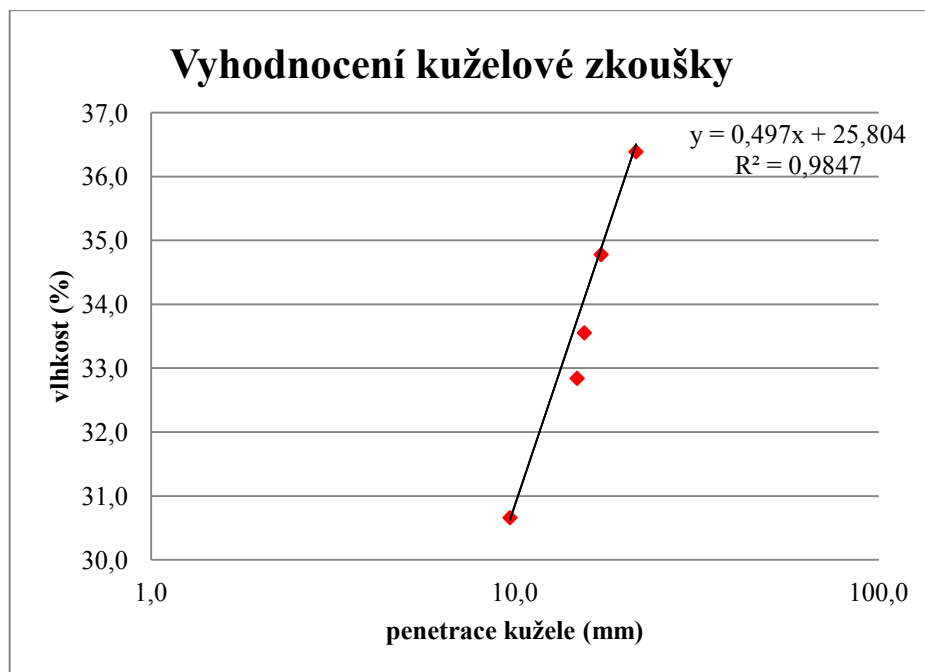
Obrázek č. 25: Zatřizovací diagramy dle ČSN EN ISO 14688 vzorku „S“



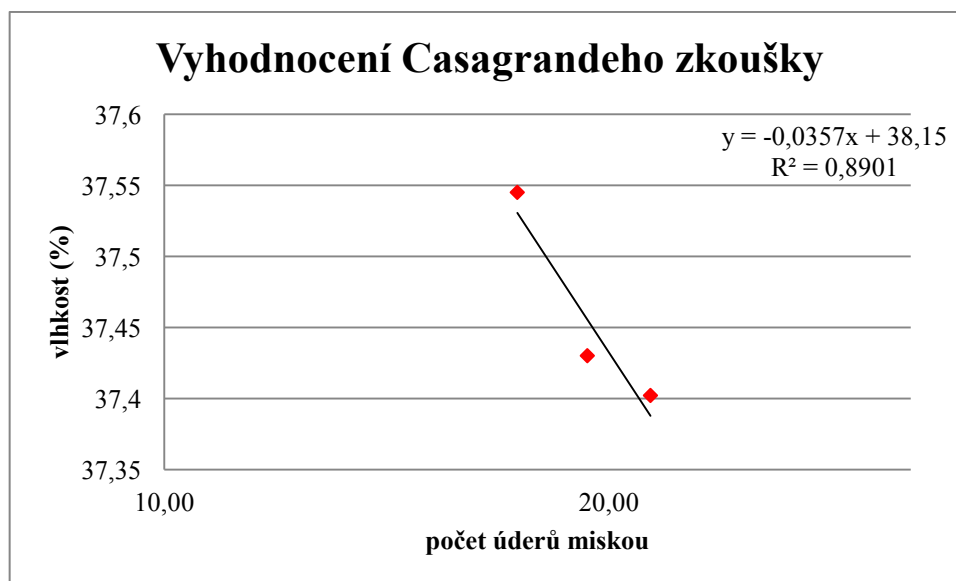
Obrázek č. 26: Zatržovací diagramy dle ČSN 73 6133 vzorku „S“

U vzorku „S“ z Prostřední Suché byla pomocí pyknometrické zkoušky stanovena zdánlivá hustota pevných částic $2,605 \text{ g/cm}^3$.

Vlhkost na mezi tekutosti byla také měřena dvěma způsoby, kuželovou zkouškou a Casagrandeho miskou.



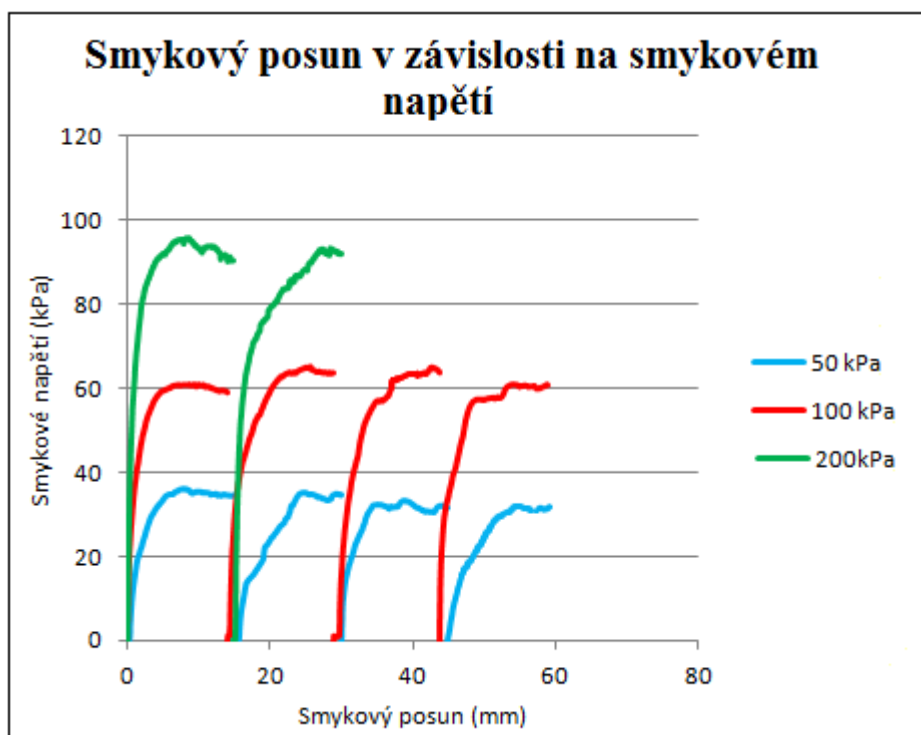
Graf č. 6: Vyhodnocení kuželové zkoušky vzorku „S“, $w_L = 35,7 \%$



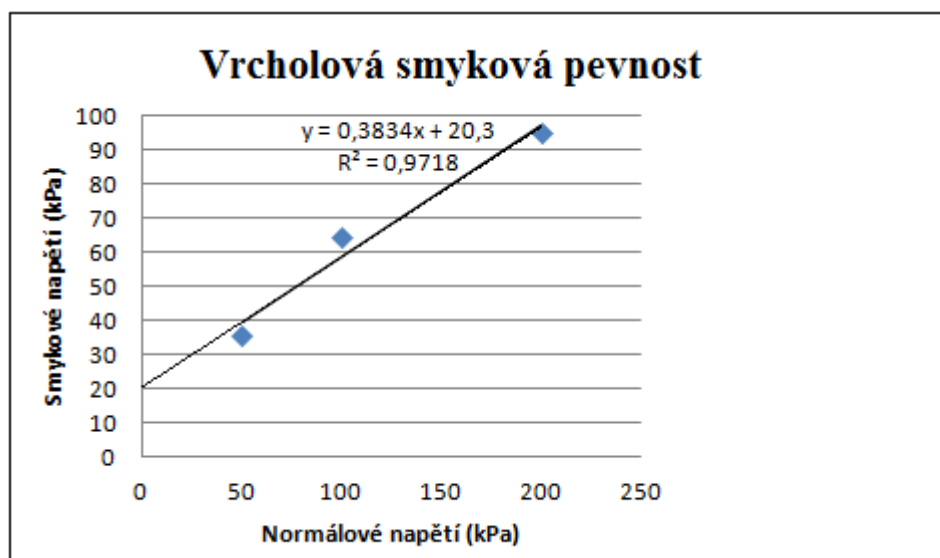
Graf č. 7: Vyhodnocení Casagrandeho zkoušky vzorku „S“, $w_L = 37,3 \%$

Po vyhodnocení kuželové zkoušky dosáhla vlhkost na mezi tekutosti hodnoty 35,7 % a u zkoušky pomocí Casagrandeho misky hodnoty 37,3 %. Vlhkosti na mezi plasticity odpovídá průměrná hodnota 24 %. Z těchto dvou vlhkostí byl určen index plasticity, který má hodnotu 11,7 %. Původní vlhkosti vzorku odpovídá hodnota $w = 28,4 \%$. Index konzistence byl stanoven na 0,63.

Pro stanovení reziduální pevnosti bylo nutné smýkat v několika krocích po smykovém posunu 15 mm. Pro zatížení 5 a 10 kg bylo měření provedeno čtyřikrát a pro zatížení 20 kg pouze dvakrát. Křivky jsou znázorněny v grafu č. 8.

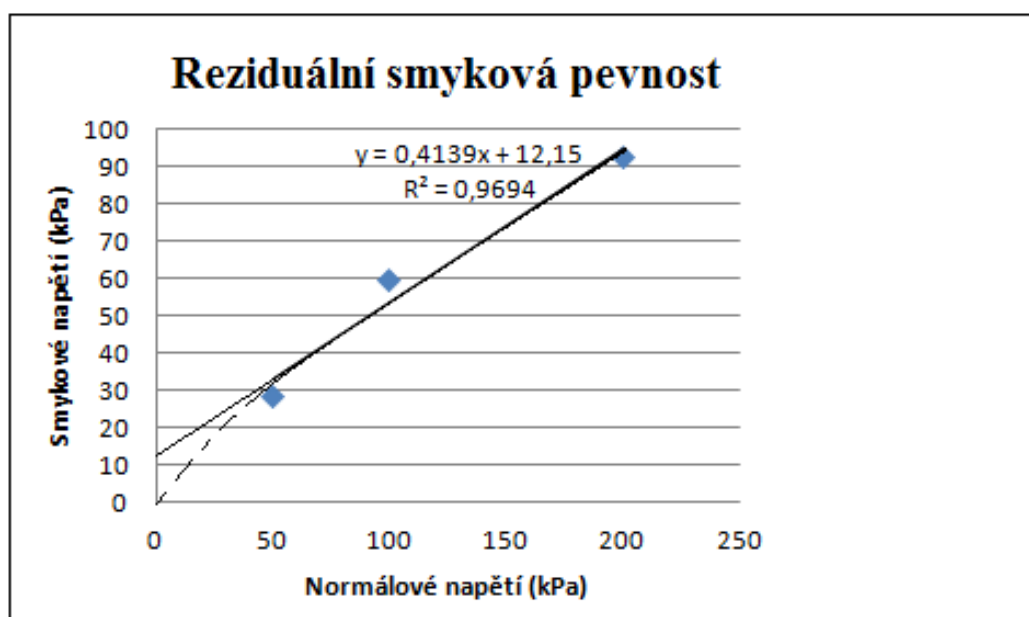


Graf č. 8: Smykový posun v závislosti na smykovém napětí vzorku „S“



Graf č. 9: Čára vrcholové smykové pevnosti vzorku „S“, $\varphi' = 20,8^\circ$, $c' = 20$;kPa

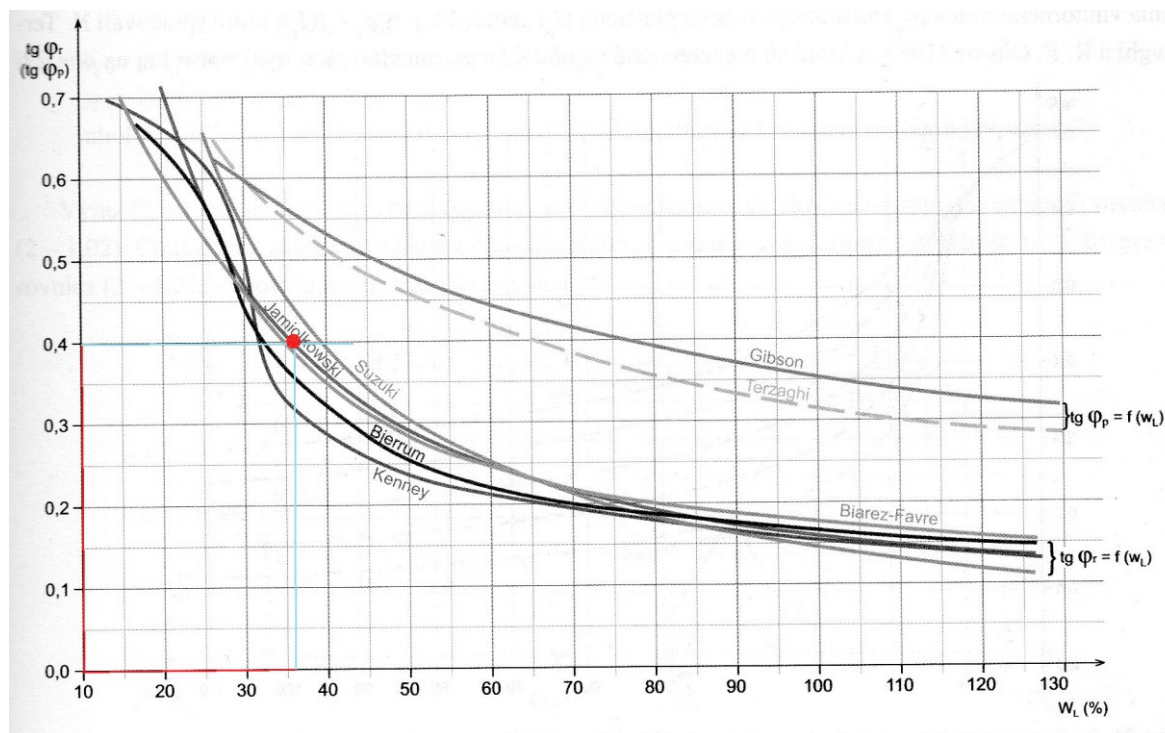
U této zeminy je vrcholový efektivní úhel vnitřního tření $\varphi' = 20,8^\circ$ a soudržnost $c' = 20$;kPa



Graf č. 10: Čára reziduální smykové pevnosti vzorku „S“, $\varphi'_r = 22,5^\circ$, $c'_r = 0$.

Při stanovení reziduální smykové pevnosti byl zjištěn efektivní úhel vnitřního tření $\varphi'_r = 22,5^\circ$ a soudržnost $c'_r = 0$.

V praktických úlohách, při kterých je potřebná operativní znalost hodnot reziduálního úhlu vnitřního tření φ_r , zejména jílovitých zemin, je vhodné využít ověřené závislosti jeho tangenciální hodnoty na mezi tekutosti w_L . V našich středoevropských podmínkách se nejvíce osvědčila závislost T.C.Kenneya a L.Bjerruma. Pro zajímavost jsem výsledky vzorku „S“ porovнала s těmito závislostmi (obr. č. 28) [13].



Obrázek č. 27: Orientační funkční závislosti (φ_p) na mezi tekutosti (w_L) jílovitých zemin s vyznačeným vzorkem jílu hlinitého (vzorek „S“) [13]

6. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo stanovení smykových parametrů jílovitých zemin v laboratorních podmínkách. Pro měření byl použit smykový krabicový přístroj pro dva různé vzorky. První vzorek (pod označením „K“) byl odebrán z obce Klimkovice a následně v laboratoři rekonstituován pomocí Proctra modifikovaného. Druhý vzorek (pod označením „S“) byl z obce Prostřední Suchá odebrán jako neporušený. Vzorky jílovitých zemin byly klasifikovány dle platných norem.

V teoretické části se práce věnovala převážně charakteristice zemin, konkrétně jílovitým zeminám, jejich mineralogickém složení a druhům smykových pevností. Byly zde přiblíženy druhy smykových zkoušek a přístroje, díky kterým je možné stanovit smykové parametry.

V experimentální části se práce zaměřila na popis zkoušek provedených na obou vzorcích. Byla stanovena zrnitost zemin, zdánlivá hustota pevných částic, mez tekutosti a mez plasticity. Nejdůležitější součástí práce byla smyková krabicová zkouška. Vzorek byl vyříznut do požadovaných rozměrů a vložen do krabice smykového přístroje. Následně byl zatížen a ponechán v přístroji, aby mohla proběhnout konsolidace. Ta byla sledována a hodnoty zapsány pro určení rychlosti smýkání vzorku. Po nastavení softwaru na požadované parametry a určenou rychlost smýkání bylo možné spustit přístroj. Výsledky byly zaznamenány a vyhodnoceny. U vzorku „K“ byl zjištěn kritický úhel vnitřního tření $\phi'_c = 35^\circ$, $c'_c = 0$. Vzhledem k porušenému vzorku nebylo možné zjistit vrcholovou smykovou pevnost. Vzorek „S“ byl pro stanovení vrcholové a reziduální pevnosti ideální. Úhel vnitřního tření dosáhl hodnoty $\phi_{ef} = 20,8^\circ$, $\phi_{ef} = 22,5^\circ$ a soudržnosti $c_{ef} = 20 \text{ kPa}$, $c_{ef} = 0$.

Vzorek	Typ vzorku	Klasifikace	ρ_s	w_L	w_P	w	Rychlost smýkání
-	-	-	g/cm^3	%	%	%	mm/min
K	Porušený	clSi, CL	2,546	32,8	19,4	16,7	0,05
S	Neporušený	siCl, CI	2,605	35,7	24,0	28,4	0,05

Vzorek	Typ vzorku	Klasifikace	Smyková pevnost					
			Vrcholová		Kritická		Reziduální	
			φ'	c'	φ'_c	c'_c	φ'_r	c'_r
-	-	-	°	<i>kPa</i>	°	<i>kPa</i>	°	<i>kPa</i>
K	Porušený	clSi, CL	-	-	35	0	-	-
S	Neporušený	siCl, CI	20,8	20	-	-	22,5	0

Cíl práce byl splněn, byly stanoveny vlastnosti a smykové parametry obou vzorků jílovité zeminy. Při srovnání s orientačními funkčními závislostmi $\tan \varphi$ na mezi tekutosti (w_L) jílovitých zemin bylo zjištěno, že výsledky měření odpovídají prezentovaným křivkám v literatuře E. FUSSGÄNGERA [13].

7. Seznam literatury

- [1] HEAD, K. H., EPPS, Roger. *Manual of soil laboratory testing. Vol. 2, Permeability, shear strength and compressibility tests*. Third edition. Caithness, Scotland: Whittles Publishing. 2011. ISBN 978-1904445-69-2
- [2] HEAD, K. H., *Manual of soil laboratory testing. Vol. 1, Soil classification and compaction tests*. Third edition. Dunbeath: Whittles Publishing. 2006. ISBN 19-044-4536-4.
- [3] ŠIMEK, Jiří, JESENÁK, Ján, EICHLER, Jaroslav, VANÍČEK, Ivan: *Mechanika zemin*. SNTL Praha 1990. ISBN:80-03-00428-4.
- [4] MOORE, D. M. & REYNOLDS, R. C., Jr. 1997. *X-Ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals*, Second edition. Oxford, New York: Oxford University Press. ISBN 0 19 508713 5.
- [5] KONTA, Jiří. *Jílové minerály Československa*. Praha: Československá akademie věd, 1957.
- [6] KNAPPETT, J.A. a R.F. CRAIG. *Craig's Soil Mechanics*. Eighth Edition. London a New York: CRC Press, 2012. ISBN 9780415561266
- [7] ČSN P 73 1005: *Inženýrskogeologický průzkum*. Praha: Český normalizační institut. 2016.
- [8] KOŘÍNEK, Robert. *Mechanika hornin a zemin* [online]. Fakulta stavební VŠB-TU Ostrava [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: <http://fast10.vsb.cz/korinek/mhz.html>
- [9] GUGGENHEIM, S. a R. MARTIN. *Definition of Clay and Clay Mineral: Joint Report of the Aipea and CMS Nomenclature Committees*. [online]. Chicago, Orlando: Department of Geological Sciences, University of Illinois at Chicago, 1995. Dostupné z: http://www.minersoc.org/pages/Archive-CM/Volume_30/30-3-257.pdf
- [10] SIPP, Siim. *How to improve clay soil*. Welcome Wildlife. [online]. [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: <https://www.welcomewildlife.com/improve-clay-soil/#prettyPhoto>
- [11] BUDHA, M. *Soil Mechanics and Foundations*. 2nd Edition. New Jersey: Wiley & Sons, 2007. ISBN 978-80-8076-124-0.

- [12] WILLIAMS, Ann, David BURNS, Geoffrey FARQUHAR a Mandy MILLS. *Field description of soil and rock*. New Zeland: NZ GEOTECHNICAL SOCIETY, 2005 [online] [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: http://www.angelofilomeno.com/upload/filed%20descr%20soil_and_rock.pdf
- [13] FUSSGÄNGER, E. *Svahové pohyby a poruchy a ich geomechanické posudzovanie*. Bratislava: Jaga group, 2016. ISBN 978-80-8076-124-0.
- [14] WEIGLOVÁ, Kamila. *Mechanika zemin*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. ISBN 978-80-7204-507-5.
- [15] PASEKA, A. *Vlastnosti jílovitých zemin*. [online]. Ústav geotechniky. [cit. 2018-03-19]. Dostupné z: http://geotech.fce.vutbr.cz/studium/geologie/vlastnosti_jilovitych_zemin.pdf
- [16] KOTLÍK, Petr, Viktor HEIDINGSFELD, Jindřich BLÁHA a Ivan VANĚČEK. *Stavební materiály historických objektů - materiály, koroze, sanace*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 1999. ISBN 80-7080-347-9.
- [17] TRASK, Parker D. a James E. H. CLOSE. *CHAPTER 50 EFFECT OF CLAY CONTENT ON STRENGTH OF SOILS*. [online]. Berkeley, California: Institute of Engineering Research [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: <https://icce-ojs-tamu.tdl.org/icce/index.php/icce/article/viewFile/2059/1731>
- [18] ČSN EN 1997-1. *Eurokód 7: Navrhování geotechnických konstrukcí - Část 1: Obecná pravidla*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [19] ČSN EN ISO 14688-2. *Geotechnický průzkum a zkoušení - Pojmenování a zařídování zemin - Část 2: Zásady pro zařídování*. Praha: Český normalizační institut, 2018.
- [20] ASMIRZA, SOFIAN. *Direct Shear Testing* [online]. Universitas Sumatera Utara: USU Repository, 2004 [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: <http://library.usu.ac.id/download/ft/sipil-sofian4.pdf>
- [21] ČSN CEN ISO/TS 17892-10. *Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin - Část 10: Krabicová smyková zkouška*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [22] ČSN 73 6133. *Návrh a provádění zemního tělesa pozemních komunikací*. Praha: Český normalizační institut, 2010.

- [23] ČSN EN ISO 17892-3. *Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin - Část 3: Stanovení zdánlivé hustoty pevných částic*. Praha: Český normalizační institut, 2016.
- [24] ČSN EN ISO 17892-4. *Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin - Část 4: Stanovení zrnitosti*. Praha: Český normalizační institut, 2017.
- [25] ČSN CEN ISO/TS 17892-12. *Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin - Část 12: Stanovení konzistenčních mezí*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [26] ČSN EN ISO 14688-1. *Geotechnický průzkum a zkoušení - Pojmenování a zařídování zemin - Část 1: Pojmenování a popis*. Praha: Český normalizační institut, 2018.
- [27] ČSN EN ISO 22475-1. *Geotechnický průzkum a zkoušení - Odběry vzorků a měření podzemní vody - Část 1: Zásady provádění*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [28] TURČEK, Peter, J. BARTÁK, J. HULLA, J. MASOPUST, A. ROZSYPAL a I. VANÍČEK. *Zakládání staveb*. Bratislava: Jaga group, 2005. ISBN 80-8076-023-3.
- [29] SHAIKH, Juzer. *What is the difference between confined and unconfined in soil?* [online]. 2017 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <https://www.quora.com/What-is-the-difference-between-confined-and-unconfined-in-soil>

8. Seznam obrázků

Obrázek č. 1: Rozdělení zemín [12] (upraveno).....	2
Obrázek č. 2: Osa konzistenčních mezí [8]	5
Obrázek č. 3: Jílovitá zemina [10].....	6
Obrázek č. 4: Schéma krystalické mřížky kaolinitu ($A = 0,1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$) [8].....	8
Obrázek č. 5: Schéma krystalické mřížky montmorillonitu [8]	8
Obrázek č. 6: Schéma krystalické mřížky illitu [8]	9
Obrázek č. 7: Coulombova čára pevnosti [1] (upraveno).....	12
Obrázek č. 8: Smyková pevnost zeminy podle Mohra [3]	13
Obrázek č. 9: Typický pracovní diagram smykového odporu na posunu [3].....	14
Obrázek č. 10: Dilatance, kontraktance [3] (upraveno).....	14
Obrázek č. 11: Typická čára pevnosti pro reziduální smykovou pevnost [1] (upraveno).....	15
Obrázek č. 12: Vzorek zkoušený v prostém tlakovém přístroji [29].....	18
Obrázek č. 13: Schéma triaxiálního smykového přístroje (komora) [14].	19
Obrázek č. 14: Schéma krabicového smykového přístroje [14].....	20
Obrázek č. 15: Princip rotační smykové zkoušky [1] (upraveno)	20
Obrázek č. 16: Odměrné válce při provádění hustoměrné zkoušky	23
Obrázek č. 18: Pyknometr při zahřívání	25
Obrázek č. 19: Kužel pro měření penetrace	26
Obrázek č. 20: Casagrandeho mísa [2]	27
Obrázek č. 21: Použitý smykový krabicový přístroj	28
Obrázek č. 22: Křivka zrnitosti vzorku „K“	29
Obrázek č. 23: Zatřizovací diagramy dle ČSN EN ISO 14688 vzorku „K“	30
Obrázek č. 24: Zatřizovací diagramy dle ČSN 73 6133 vzorku „K“	31
Obrázek č. 25: Křivka zrnitosti vzorku „S“	35
Obrázek č. 26: Zatřizovací diagramy dle ČSN EN ISO 14688 vzorku „S“	36
Obrázek č. 27: Zatřizovací diagramy dle ČSN 73 6133 vzorku „S“	37
Obrázek č. 28: Orientační funkční závislosti (ϕ_p) na mezi tekutosti (w_L) jílovitých zemín s vyznačeným vzorkem jílu hlinitého (vzorek „S“) [13]	41

9. Seznam tabulek

Tabulka č. 1: Kritéria ulehlosti dvou platných norem [7].	4
Tabulka č. 2: Konzistence zeminy podle dvou platných norem [7].	5
Tabulka č. 3: Přehled základních laboratorních zkoušek [14].	17
Tabulka č. 4: Třídy kvality vzorků zemin pro laboratorní zkoušky a použité kategorie odběru vzorku [18]	21

10. Seznam grafů

Graf č. 1: Vyhodnocení kuželové zkoušky vzorku „K“, $wL = 32,8 \%$	32
Graf č. 2: Vyhodnocení Casagrandeho zkoušky vzorku „K“, $wL = 34,4 \%$	32
Graf č. 3: Stanovení rychlosti smýkání vzorku „K“	33
Graf č. 4: Smykový posun v závislosti na smykovém napětí vzorku „K“	34
Graf č. 5: Čára kritické smykové pevnosti vzorku „K“	34
Graf č. 6: Vyhodnocení kuželové zkoušky vzorku „S“, $wL = 35,7 \%$	38
Graf č. 7: Vyhodnocení Casagrandeho zkoušky vzorku „S“, $wL = 37,3 \%$	38
Graf č. 8: Smykový posun v závislosti na smykovém napětí vzorku „S“	39
Graf č. 9: Čára vrcholové smykové pevnosti vzorku „S“, $\phi' = 20,8^\circ$, $c' = 20$; kPa.	40
Graf č. 10: Čára reziduální smykové pevnosti vzorku „S“, $\phi'_r = 22,5^\circ$, $c'_r = 0$	40